

quilômetros antes de chegar à Terra, comparado com a distância quando os dois planetas estavam mais próximos. Se a luz tinha uma velocidade finita, então levaria mais tempo para cobrir essa distância extra, dando a impressão de que Io estava atrasada. Resumindo, Römer afirmou que Io era perfeitamente regular, e sua irregularidade aparente era uma ilusão provocada pelos tempos diferentes que a luz de Io levava para cobrir distâncias diferentes até a Terra.

Para ajudar a entender o que estava acontecendo, imagine que você está próximo de um canhão que é disparado exatamente a cada hora. Você ouve

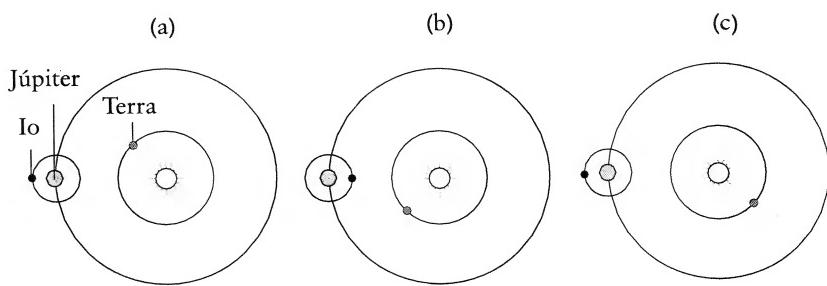


Figura 19 Ole Römer mediou a velocidade da luz ao estudar os movimentos da lua Io de Júpiter. Esses diagramas apresentam uma ligeira variação em relação ao método real. No diagrama (a), Io está a ponto de desaparecer por trás de Júpiter; no diagrama (b), Io já completou meia revolução, de modo que está na frente de Júpiter. Enquanto isso, Júpiter quase não se moveu, mas a Terra movimentou-se de modo significativo porque a Terra orbita o Sol 12 vezes mais rapidamente do que Júpiter. Um astrônomo na Terra mede o tempo que se passou entre (a) e (b), ou seja, o tempo que levou para Io completar metade de uma revolução.

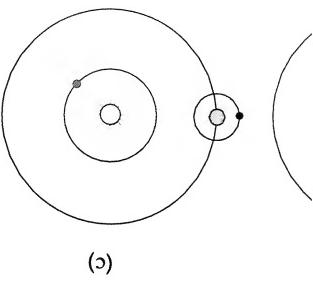
No diagrama (c), Io já completou outra meia revolução de volta para onde começou, enquanto a Terra se moveu para uma posição ainda mais afastada de Júpiter. O astrônomo mede o tempo entre (b) e (c), que deveria ser o mesmo que entre (a) e (b), mas de fato se revela significativamente mais longo. A razão para o tempo extra é que a luz de Io leva um pouco mais de tempo para cobrir a distância extra até a Terra no diagrama (c), porque a Terra agora está mais afastada de Júpiter. O atraso no tempo e a distância entre a Terra e Júpiter podem ser usados para estimar a velocidade da luz. (A distância percorrida pela Terra nesses diagramas foi exagerada porque Io orbita Júpiter em menos de dois dias. A posição de Júpiter também mudaria e complicaria a questão.)

o canhão e aciona o s... dirigindo em uma lin... tros de distância quan... um fraco estampido.] você perceberá ter ou... ro e não sessenta mi... sessenta minutos entre... disparo leva para cobr... perfeitamente regular... seis minutos devido à...

Depois de passar tr... relativas de Terra e Jú... luz seria 190.000 km/h... mas o que interessa é q... dade finita e deduziu u... debate fora resolvido, ...

Contudo Cassini fi... tado, porque ele não... Römer fossem basead... isso Cassini tornou-se u... ria que ainda preferia a... não desistiu e usou sua... de Io, em 9 de novemb... relação ao horário prev... não disse?", o eclipse de... mostrara que estava cer... dida da velocidade da lu...

A previsão do eclips... todas. E, no entanto, con... centro, fatores além da p... so científico. Cassini ocu... mais do que ele, e assim,... se manter vivo, ele cons... Römer de que a luz tinh...



(2)

contudo, Cassini e seus colegas foram substituídos por uma nova geração de cientistas, que examinaram a conclusão de Römer de modo imparcial, fizeram seus próprios testes e a aceitaram.

Uma vez estabelecido que a velocidade da luz era finita, os cientistas se voltaram para outro mistério em relação a sua propagação: qual era o meio responsável pelo deslocamento da luz? Os cientistas sabiam que o som pode viajar em uma variedade de meios — os seres humanos, quando falam, en- viam ondas sonoras através de um meio gasoso, o ar; as baleias cantam umas para as outras usando a água líquida como meio, e podemos ouvir o bater dos nossos dentes através do meio sólido dos nossos ossos entre os dentes e os ouvidos. A luz também pode viajar através de gases, líquidos e sólidos, como o ar, a água e o vidro, mas havia uma diferença fundamental entre luz e som, como fora demonstrado por Otto von Guericke, o burgomestre de Magdenburgo que realizara uma série de experiências famosas em 1657.

Von Guericke tinha inventado a primeira bomba de vácuo e conseguiu explorar as estranhas propriedades do vácuo. Em uma experiência, ele colocou dois grandes hemisférios de latão unidos frente a frente e sugou o ar de dentro deles de modo que se comportassem como duas ventosas excepcionalmente poderosas. Então, numa maravilhosa exibição de espetáculo científico, ele demonstrou que dois conjuntos de oito cavalos não eram capazes de separar os dois hemisférios.

Numa experiência ainda mais elegante, Von Guericke retirou o ar de uma jarra de vidro contendo uma campainha. À medida que o ar era sugado, a platéia não conseguia mais ouvir a campainha tocando, mas podia ver o martelinho golpeando a sineta. Estava claro, portanto, que o som não podia viajar através do vácuo. Ao mesmo tempo, a experiência mostrou que a luz podia viajar pelo vácuo, porque a campainha não desapareceu e o interior da jarra não ficou escuro. De modo estranhíssimo, se a luz podia viajar através do vácuo então alguma coisa podia viajar através do nada.

Confrontados com esse aparente paradoxo, os cientistas começaram a se perguntar se o vácuo era de fato vazio. O ar fora retirado da jarra, mas talvez ainda existisse alguma coisa lá dentro, algo que fornecera um meio para a transmissão da luz. No século XIX, os cientistas tinham proposto que todo o universo era permeado por uma substância que chamaram de éter

luminescente, que, de alguma
luz. Essa substância hipotética
notáveis, como lembrou o

— Agora, o que é o éter lurdensa do que o ar — miPodemos ter alguma idéreal, com grande rigidezpara vibrar 400 bilhõesdensidade que não opõeque através dela.

Em outras palavras, o éter insubstancial. Era também Estava em toda parte ao 1 porque ninguém jamais c disso, Albert Michelson, c Física, achava que podia p

Os pais judeus de Michelangelo, que nasceram em 1854, quando ele tinha 10 anos, em São Francisco, onde se graduou em óptica. O que pôde fazer na Academia: "Se no futuro fizermos mais ao conhecimento que saberá o suficiente para ser um Michelson, de modo integral, e, em 1879, que a velocidade da luz era preciso do que qualquer eu

Então, em 1880, Mic
que provasse a existência
dia um único raio de luz
raio viajava na mesma dir

ratio viajava na mesma direção do movimento da Terra através do espaço, dia um único raios dos raios separados, perpendiculars. Um que provasse a existência do éter condutor da luz. Seu equipamento divulgado, em 1880, Michelson projetou uma experiência que ele torcia

preciso do que qualquer estimação anterior. que a velocidade da luz de 299.910 ± 50 km/s, o que era vinte vezes mais tempo integral, e, em 1878, com apenas 25 anos de idade, ele determinou Michelson, de modo inteligente, passou a dedicar-se à pesquisa óptica em que sabia o suficiente para ser de alguma utilidade ao seu país". em que mais ao conhecimento da artilharia naval, pode chegar uma ocasião trágica e dos Unidos, onde se graduou em 25º lugar em conhecimentos navais e da Academia: "Se no futuro a seguirme observação do superintendente metro em óptica. O que provocou a seguinte observação do superintendente dos Estados Unidos, quando ele tinha apenas dois anos de idade. Ele passou a infância em 1854, quando ele tinha apenas dois anos de idade. Ele passou a infância em São Francisco antes de entrar para a Academia Naval dos Estados Unidos

Os pais judeus de Michelson fugido das perseguições na Prússia física, achava que podia provar a sua existência. disso, Albert Michelson, o primeiro americano a ganhar o prêmio Nobel de Física em 1907, e no entanto era difícil de identificar por que ninguém jamais o viria, agarra ou deixa de cara com ele. Apesar de em toda parte ao nosso redor, sem atrito e quimicamente inerte, insubstancial. Era também transparente, sem atrito e no entanto estranhamente

Em outras palavras, o éter era inviolável forte e no entanto estranhamente denso que não opõe a menor resistência a nenhum corpo que se desloca. densidade que não opõe a menor resistência a nenhum corpo que se desloca. para vibrar 400 bilhões de vezes por segundo; e, no entanto, ser de uma real, com grande rigidez em comparação com sua densidade: pode ser feita Podemos ter alguma ideia de seus limites. Acreditemos que é uma coisa densa do que o ar — milhões e milhões de vezes menos densa do que o ar.

Agora, o que é o éter luminoso? É uma matéria prodigiosamente menor que lembrou o grande cientista Vitóriano Loreto Kellvin:

enquanto o outro se movia numa direção em ângulo reto com o primeiro. Ambos percorriam uma distância igual, eram refletidos por espelhos e então voltavam a se combinar num único feixe. Ao se combinarem, sofriam um processo conhecido como interferência, que permitia que Michelson comparasse os dois raios de luz e identificasse qualquer discrepância nos tempos de percurso.

Michelson sabia que a Terra viaja a aproximadamente 100.000 km/h na sua trajetória em torno do Sol, o que presumivelmente significava que ela passaria através do éter com essa velocidade. E, como se supunha que o éter fosse um meio estável, que permeava o universo, a passagem da Terra através do espaço deveria criar uma espécie de *vento de éter*. Isso seria semelhante ao falso vento que você sente se andar num carro sem capota, em alta velocidade, num dia calmo — não está na verdade ventando, mas parece que está devido ao seu movimento. Portanto, se a luz fosse transportada no éter e por meio dele, sua velocidade seria afetada pelo vento de éter. Mais especificamente, na experiência de Michelson um raio de luz estaria viajando ao vento do éter e contra ele, e assim deveria ter sua velocidade afetada de modo significativo enquanto o outro raio estaria atravessando o vento de éter lateralmente e sua velocidade seria menos afetada. Se os tempos de percurso dos dois raios fossem diferentes, então Michelson conseguiria usar essa discrepancia como uma forte evidência a favor da existência do éter.

A experiência para detectar o vento de éter era tão complexa que Michelson explicou seus termos na forma de um enigma.

Suponha que temos um rio com 100 pés (30 metros) de largura e dois nadadores que nadam com a mesma velocidade, digamos 5 pés por segundo (1,5 metro por segundo). O rio flui com uma corrente estável de 3 pés (90 centímetros por segundo). Os nadadores disputam do seguinte modo: ambos partem de um mesmo ponto em uma das margens. Um deles nada diretamente através do rio para o ponto mais próximo da margem oposta, então vira e nada de volta. O outro fica num dos lados do rio, nadando rio acima por uma distância (medida ao longo da margem) igual à largura do rio, e então volta ao ponto de partida. Qual deles chega primeiro? [Ver a solução na figura 20.]

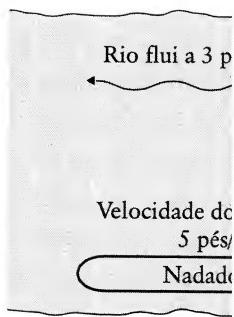


Figura 20 Albert Michelson cia do éter. Os dois nadado vendo-se em direções perp partida. Um deles nada pri nada através da corrente — o vento do éter enquanto c vencedor de uma corrida ei dores que podem nadar co nadador A vai rio acima nu corrente outros 100 pés, en rendo dois trechos de 100

O tempo que o nadado sar. Nadando a favor da cor 3 pés/s), assim ele leva 12, correnteza, ele nada com ur segundos para percorrer es nadar os 200 pés é de 62,5

O nadador B, ao atrav correnteza. O teorema de Pi terá um componente rio ac nente transversal de 4 pés/ segundos e então leva outr segundos para nadar 200 m

Embora ambos os nadada, o nadador que cruza a co depois contra a correnteza, deslocasse através do vento que se deslocasse primeiro experiência para verificar se

O nadador B, ao atravessar o rio, tem que nadar num ângulo para compensar a correnteza. O terema de Pitágoras nos diz que, se ele nadar a 5 pés/s no ângulo correto, terá um componente rio acima de 3 pés/s que cancela o efeito da correnteza em compenso. Neste transversal de 4 pés/s . Com isso ele nada os primeiros 100 pés em apenas 25 segundos e entãoleva outros 25 segundos para voltar, levando um tempo total de 50 segundos para nadar 200 metros.

Embora ambos os nadadores possam nadar com a mesma velocidade em ângula para-a-depósito contra a correnteza, vence a corrida contra o nadador que vai a favor e da, o nadador que cruzou a correnteza contra a corrida contra o nadador que vai a favor e que se desloca esse através do vento do eter teria um tempo de viagem mais curto do que um ratio de depósito contra a correnteza. Por isso, Michaelson suspendeu a corrida contra o nadador que vai a favor e que se desloca esse primeiro a favor e depois contra a correnteza. Ele projeto uma experiência para verificá-la se isso acontecia.

The diagram illustrates the relative motion of two swimmers, Nadador A and Nadador B, in a river flowing at 3 pés/s. Nadador A swims upstream at 5 pés/s, and Nadador B swims downstream at 4 pés/s. The distance between them increases over time due to the river's current.

Michelson investiu nas melhores fontes de luz e espelhos disponíveis para sua experiência e tomou todas as precauções possíveis na montagem do aparelho. Tudo foi cuidadosamente alinhado, nivelado e polido. Para aumentar a sensibilidade de seu equipamento e minimizar os erros, ele fez a montagem principal flutuar num grande banho de mercúrio, isolando-a, portanto, de fatores externos, como os tremores provocados por passos distantes. O objetivo de sua experiência era provar a existência do éter, e Michelson fez tudo o que podia para maximizar a chance de sua detecção. E por esse motivo ficou atônito com a completa e total incapacidade de detectar qualquer diferença nos tempos de chegada dos dois raios perpendiculares. Não havia o menor sinal de éter. Era um resultado chocante.

Desesperado para descobrir o que saíra errado, Michelson recrutou o químico Edward Morley. Juntos, eles reconstruíram o aparelho, aperfeiçoando cada peça de equipamento para tornar a experiência ainda mais sensível, e então voltaram a fazer as medições. Finalmente, em 1887, depois de passarem sete anos repetindo a experiência, eles publicaram seus resultados definitivos. Não havia sinal de éter. Portanto, eles foram forçados a concluir que o éter não existia.

Levando em conta seu conjunto ridículo de propriedades — supunha-se que fosse a substância menos densa e mais rígida do universo —, não devia causar surpresa que o éter fosse uma ficção. Não obstante, os cientistas o abandonaram com grande relutância, porque fora o único meio concebível para explicar como a luz era transmitida. Até mesmo Michelson teve problemas para aceitar sua própria conclusão. Ele certa vez se referiu ao “velho e amado éter, que agora foi abandonado, embora eu, pessoalmente, ainda me agarre um pouco a ele”.

A crise da não-existência do éter foi aumentada porque se supunha que ele fosse responsável pelo transporte dos campos elétricos e magnéticos, assim como da luz. A terrível situação foi bem resumida pelo escritor científico Banesh Hoffmann:

Primeiro tínhamos o éter luminescente
Depois tínhamos o éter eletromagnético,
E agora não temos nenhum dos dois.

Assim, no fim do séc^o Ironicamente, ele tinha cias bem-sucedidas, relataria de uma experiênci a existência do éter, nã que a luz, de algum moço desprovido de qualq

A conquista de Mic ppecializado e anos de es solitário, sem saber da c não existia, mas basead Albert Einstein.

As expe

As proezas juvenis de Ein volvida brotaram em grado ao seu redor. Ao long ele nunca parou de se ma Mesmo na idade de cinco namento de uma bússola invisível que puxava a ag natureza do magnetismo insaciável de Einstein par

Como Einstein disse especiais. Sou apenas ap mais importante é não p pria razão de existir. Não mos os mistérios da eterni Já é bastante se alguém te tério a cada dia”. O prê vista: “Acho que os físicos cem e mantêm sua curios

As proezas juvenis de Einstein e mais tarde sua genialidade plenamente desenhada brotaram em grande parte de sua carreira prolífica, revolucionária e visionária, ao seu redor. Ao longo de sua carreira prolífica, revolucionária e visionária, ele nunca parou de se maravilhar com as leis subjacentes que regem o universo. Mesmo na idade de cinquenta anos, Einstein ficou fascinado pelo misterioso fundo da natureza do magnetismo o fascinou pela vida intelectual, o que era tipico do apetite inacessivel que puxava a agulha a por que ela apontava sempre para o norte? A mais importante é apaixonadamente curioso". Ele também escreveu: "O que fascinais, sou apenas apaixonadamente curioso". Ele também escreveu: "O príncipio razão de existir. Não podemos deixar de nos admirar quando contemplamos os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade.

Já é bastante se alguma tentar compreender apenas um pouquinho desse mistério a cada dia". O premio Nobel Lise Meitner Isaac Rabi referido esse ponto de vista: "Acho que os físicos são os Peter Pan da raga humana. Elas nunca crescem e mantêm sua curiosidade".

As experiências mentais de Einstein

Nesse aspecto, Einstein tinha muito em comum com Galileu. Einstein escreveu uma vez: "Estamos na situação de uma criança pequena que entra em uma imensa biblioteca cujas paredes estão cobertas até o teto com livros em muitos idiomas diferentes". Galileu fez uma analogia semelhante, mas ele condensou toda a biblioteca da natureza em um único grande livro e uma única linguagem que sua curiosidade o compelia a decifrar: "Ele está escrito na linguagem da matemática e as letras são triângulos, círculos e outras figuras geométricas, sem as quais é humanamente impossível entender uma única palavra. E sem elas ficamos vagando por um labirinto escuro".

Galileu e Einstein também estão unidos por um interesse comum no princípio da relatividade. Galileu descobriu o princípio da relatividade, mas foi Einstein quem o explorou completamente. Numa forma simples, a relatividade de Galileu diz que todo movimento é relativo, o que significa que é impossível saber se estamos em movimento sem recorrer a uma estrutura de referência externa. Galileu declarou vividamente o que ele queria dizer por relatividade no *Diálogo*:

Tranque-se com um amigo na cabine principal sob o convés de um navio e leve com você algumas moscas, borboletas e outros pequenos animais voadores. Tenha também um aquário com peixes dentro e pendure uma garrafa que goteje sobre uma bacia embaixo dela. Com o navio parado, observe cuidadosamente como os pequenos animais voam com igual velocidade em todos os lados da cabine; como os peixes nadam indiferentemente em todas as direções e como as gotas caem na bacia embaixo. E, ao jogar alguma coisa para seu amigo, você não precisa atirá-la com mais força em uma direção ou na outra, a distância é igual. Se saltar com os pés unidos, vai percorrer distâncias iguais em todas as direções.

Quando tiver observado tudo isso com cuidado... faça com que o navio navegue com a velocidade que desejar, desde que o movimento seja uniforme e não flutuante desse modo ou daquele. Vai descobrir que não há nenhuma mudança nos efeitos citados, nem poderá dizer, a partir deles, se o navio está se movendo ou parado.

Em outras palavras, enquanto estiver se movendo a uma velocidade constante e numa linha reta, não há nada que possa fazer para medir a velocidade

de deslocamento, ou parece porque tudo ao se movimentos (por exei nuam inalterados, a de bém o cenário de Galil de modo que você estat algum movimento referência. Se você se i pões nos ouvidos e os c me, será muito difícil c está parado na estação,

Essa foi uma das n vencer os astrônomos c críticos anticopernican redor do Sol porque se ou como o solo sendo j ce. Contudo, o princípio enorme velocidade da atmosfera, também se i Uma Terra móvel é efet se ela fosse estática.

De modo geral, a i pode afirmar se estamos imóveis. Isso é verdade olhos e os ouvidos tam quer outro modo.

Sem saber que Mich tia, Einstein usou o pr explorar a possível exis de galileana no contex como *experimento gedas* de uma experiência p do físico, em geral porq realizar no mundo real.

Sem saber que Michelson e Morley tinham provado que o eter não existe, tia, Einstein usou o princípio da relatividade de Galileu como base para explorar a possivel existencia do eter. Em especial, ele recorreu a relativida- de galileana no contexto de um experimento mental, também conhecido como experimento gedanken (da palavra alema para "pensamento"). Trata- se de uma experiência puramente imaginaria que acontece apenas na cabeça do físico, em geral porque envolve um procedimento que não é pratico de se realizar no mundo real. Embora seja uma construção puramente teórica, um

De modo geral, a teoria da relatividade de Galileu declarava que não se pode afirmar se estamos nos movendo com rapidez, lamentamente ou se estamos imóveis. Isso é verdade se vocé estiver isolado na Terra, ou num trem com os olhos e os ouvidos tampados, ou isolado de uma referência externa de qualquer outro modo.

de deslocamento, ou para dirigir-se para a realidade em movimento. Isto acontece porque tudo ao seu redor se move com a mesma velocidade, e todos os movimentos (por exemplo, garrafas gotejando, borboletas voando) continuam imalterados, a despeito de voces estarem movimentados ou parados. Também o cenário de Galileu acontece "na cabine principal, debaixo do convés", de modo que voces estão isolados, o que elimina qualquer esperança de detecção de movimento relativo recorrendo-se a uma estrutura extrema como referência. Se voces se isolam de modo semelhante, ficando sentado com tãos poucos ouvidos e os olhos fechados, dentro de um trem numa linha unifilar, serão muito difícil dizer se o trem está correndo a 100 km/h ou se ainda está parado na estação, o que é outra demonstração da relatividade galileana.

Essa foi uma das maiores descobertas de Galileu, porque ajudou a confirmar os astrónomos géticos de que a Terra de fato gira ao redor do Sol. Os críticos anticopernicanos argumentavam que a Terra não podia se mover ao redor do Sol porque sentíam que esse movimento como um vento constante ou como o solo se move puxado sob nossos pés, o que claramente não acontece. Contudo, o princípio da relatividade de Galileu diz que não sentimos a enorme velocidade da Terra através do espaço porque tudo, do solo à atmosfera, também se move pelo espaço com a mesma velocidade que experimentamos.

experimento mental pode, com freqüência, levar a um profundo entendimento do mundo real.

Em uma experiência mental realizada em 1896, quando tinha apenas 16 anos de idade, Einstein imaginou o que aconteceria se ele pudesse viajar com a velocidade da luz enquanto segurava um espelho diante dele. Particularmente, imaginava se seria capaz de ver o próprio reflexo. A teoria vitoriana do éter o concebia como uma substância estática que permeava todo o universo. A luz era supostamente transportada pelo éter, assim isso implicava que ela se deslocava com a velocidade da luz (300.000 km/s) em relação ao éter. Na experiência mental de Einstein, ele, seu espelho e seu rosto, também viajavam pelo éter com a velocidade da luz. Portanto, a luz deveria deixar o rosto de Einstein e tentar viajar até o espelho em sua mão, mas nunca conseguiria deixar o seu rosto, e muito menos alcançar o espelho, porque tudo se movia com a velocidade da luz. E, se a luz não podia alcançar o espelho, então ela não seria refletida de volta e, consequentemente, Einstein não seria capaz de ver o próprio reflexo.

Esse cenário imaginário era chocante porque desafiava completamente o princípio da relatividade de Galileu, segundo o qual uma pessoa que se deslocasse a uma velocidade constante não conseguiria determinar se estava se movendo rapidamente, lentamente, para frente ou para trás — ou até se estava de fato se movendo. A experiência mental de Einstein implicava que ele saberia quando estava se movendo com a velocidade da luz porque o seu reflexo desapareceria.

O menino prodígio tinha feito uma experiência imaginária baseado num universo cheio de éter, e o resultado era paradoxal, porque contradizia o princípio de relatividade de Galileu. A experiência mental de Einstein pode ser encenada no cenário de Galileu, sob o convés do navio: o marinheiro saberia se seu navio estava se movendo com a velocidade da luz porque seu reflexo desapareceria. Contudo Galileu tinha declarado com firmeza que o marinheiro não conseguiria perceber se o navio estava em movimento.

Alguma coisa tinha que ceder. Ou a relatividade de Galileu estava errada, ou a experiência mental de Einstein tinha uma falha fundamental. No final, Einstein percebeu que sua experiência falhara porque era baseada num universo cheio de éter. Para resolver o paradoxo, concluiu que a luz não

viaja a uma velocidade fixa pelo éter e que o éter nem é só isso que Michelson

Pode-se desconfiar da teoria da relatividade especialmente se a física das experiências reais, com equipamentos mentais estão na realidade. E é por isso que a experiência de Einstein é importante. Não obstante, a experiência de sua mente jovem e, obviamente, as implicações de um universo com velocidade da luz constante.

A noção vitoriana do éter não é mais adequado para o que é a velocidade da luz. Todos aceitam que a velocidade da luz é constante, 300.000 km/s, em relação ao meio no qual se move. O sentido no universo vitoriano é que a velocidade da luz tinha mostrado que não havia um meio no qual viajar, o que é a velocidade da luz?

Einstein pensou na questão por algum tempo e, finalmente, chegou a uma solução que era muito mais intuitiva. À princípio, ele não sabia que a velocidade da luz se desloca a uma velocidade constante, independentemente do observador. Em outras palavras, a velocidade da luz é sempre constante, 300.000 km/s, independentemente da velocidade relativa do observador. Isso significa que a velocidade da luz é constante, independentemente da velocidade relativa do observador.

Imagine um garoto correndo a uma velocidade de 40 m/s. Ele está a uma distância de 100 metros de uma lâmpada que está emitindo luz. A velocidade da luz é de 300.000 km/s, ou seja, 300.000 m/s. A velocidade da luz é constante, independentemente da velocidade relativa do observador.

Imagem um garoto com uma zarrabatana que sempre levava com ele para o deserto. Ele descreveu que a velocidade de 40 m/s. Vou escrever essa frase de novo, num muro, num ponto da rua a velocidade de 40 m/s. Vou escrever essa frase de novo, num muro, num ponto da rua desistente do garoto. Ele descreveu que a velocidade de 40 m/s. Vou escrever essa frase de novo, num muro, num ponto da rua desistente do garoto.

Vasja a uma velocidade fixa em relação ao etér, que a luz não é transportada pelo etér e que o etér nem mesmo existe. Sem que ele soubesse, era exata- mente isso que Michelson e Morley já tinham descoberto.

Pode-se desconferir do experimento mental um tanto tortuoso de Einstein, especialmente se a física é vista como uma disciplina que depende de expre- sões matemáticas, com equipamentos verdados e medidores reais. De fato, expre- sões matemáticas nas fronteiras da física e não são totalmente confiáveis,

e por isso que a experiência real de Michelson e Morley foi tão importan- te. Não obstante, a experiência magnética de Einstein demonstra o brilho de sua mente jovem, o que é mais importante, o que no rumo para abordar as implicações de um universo desprovido de etér e seu significado em ter-

ervilha deixa o cano com a velocidade de 40 m/s, cruza o espaço intermedio a 40 m/s e, quando acerta, na sua testa, certamente você sente como se ela estivesse se movendo a 40 m/s. Se o garoto montar na bicicleta e correr em sua direção a 10 m/s e disparar a zarabatana de novo, a ervilha ainda deixará o cano a 40 m/s, mas atravessará a distância a 50 m/s e o atingirá à mesma velocidade. A velocidade extra se deve ao fato de a ervilha ser lançada da bicicleta em movimento. E, se você correr na direção do garoto a 4 m/s a situação ficará ainda pior, porque a ervilha o atingirá agora movendo-se a 54 m/s. Em resumo, você (o observador) perceberá uma velocidade diferente das ervilhas dependendo de uma variedade de fatores.

Einstein acreditava que a luz se comportava de um modo diferente. Quando o garoto não está andando em sua bicicleta, então a luz do farolete o atinge com a velocidade de 299.792.458 m/s. Quando ele pedala a bicicleta em sua direção a 10 m/s a luz do farolete da bicicleta continua a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. E, mesmo se você andar em direção à bicicleta enquanto esta se move em sua direção, a luz ainda continuará a atingi-lo com a velocidade de 299.792.458 m/s. A luz, insistia Einstein, se desloca com uma velocidade constante em relação ao observador. Quem quer que esteja medindo a velocidade da luz, sempre encontrará o mesmo resultado, em qualquer situação. Experiências demonstrariam mais tarde que Einstein estava correto. A distinção entre o comportamento da luz e de outras coisas, tais como ervilhas, está exemplificada abaixo

| Sua visão da velocidade das ervilhas | Sua visão da velocidade da luz |
|------------------------------------------------|--------------------------------|
| Ninguém se move | 40 m/s |
| Menino pedala em sua direção a 10 m/s | 299.792.458 m/s |
| ...e você caminha em direção ao garoto a 4 m/s | 299.792.458 m/s |

Einstein estava conveniente para o observador p sua experiência imaginária de acerto com o observador em sua experiência da luz e, não obstante, a velocidade da luz, porque a luz deixaria Einstein com a mesma velocidade, o que Exatamente a mesma coisa que o espelho do banheiro — a luz seria refletida de volta con Em outras palavras, ao pr relação ao observador, ent movendo com a velocidade é exatamente o que o princípio de você tenha a mesma ex

A constância da velocidade da luz é uma conclusão notável e continua a ser verdadeira. Einstein ainda era apenas um adolescente da juventude que explorou o público e abalaria o mundo quanto trabalhava em particular

De modo decisivo, ao longo de sua energia natural, sua criação e educação de seu colégio. Ele disse que seu professor, incluindo o eminentemente respeitável Dr. Weber, lhe disse: "Você é um gênio. Mas tem um grande defeito: Einstein se devia, em parte, a sua paixão por física, o que era o motivo de Weber, em vez de Herr Professor

De modo decisivo, ao longo desse período de estudos, Einstein manteve sua energia natural, sua criatividade e curiosidade, apesar da natureza auto-ritátria de seu colega. Ele disse uma vez: "A única coisa que interessa no meu aprendizado é a minha formação". Ele dava pouca atenção aos seus professores, incluindo o eminente Hermann Minkowski, que deu o troco ao classificá-lo como "um cachorro preguiçoso". Outro professor, Heinrich Weber, lhe disse: "Você é um gato inteligente, Einstein, muito inteligente. Mas tem um grande defeito: não deixa que lhe ensinem nada". A atitude de Einstein se devia, em parte, à recusa de Weber de ensinar as últimas ideias em física, o que era o motivo também de Einstein se dirigir a ele como Herr Weber, em vez de Herr Professor Weber.

Einstein estava convencido de que a velocidade da luz devia ser constante para o observador porque parecia o único meio de fazer sentido para sua experiência imaginária com o espelho. E possivel reexaminar o experimento mental de acordo com a nova regra para a velocidade da luz. Se era observador em sua experiência imaginária, Einstein viajava com a velocidade da luz, não obstante, continuaria a ver a luz deixando o seu rosto com a velocidade da luz, porquê ela se deslocava em relação ao observador. E assim a luz deixaria Einstein com a velocidade da luz e seria refletida de volta com a mesma velocidade, o que significa que ele seria capaz de ver o seu reflexo. Exatamente a mesma coisa aconteceria se voce estivesse imóvel diante do espelho do banheiro — a luz deixaria seu rosto com a velocidade da luz e seria refletida de volta com a velocidade da luz e voce veria o seu reflexo.

Em outras palavras, ao presunir que a velocidade da luz é constante em relação ao observador, entao Einstein não seria capaz de dizer se estava se movendo com a velocidade da luz ou se estava imóvel no seu banheiro. Isto é exatamente o que o princípio da relatividade de Galileu exigia, ou seja, que voce tenha a mesma experiência para o seu movimento.

A constância da velocidade da luz em relação ao observador foi uma conclusão notável e continuou a dominar os pensamentos de Einstein. Ele ainda era apaixonado um adolescente, e assim, foi com a ambição a ingenuidade da juventude que explorou as implicações de suas ideias. Por fim, ele iria publicar e abalaria o mundo com suas ideias revolucionárias, mas por enquanto trabalhava em particular e continuava com sua formação.

Como resultado desse choque de personalidades, Weber não escreveu a carta de recomendação que Einstein precisava para seguir uma carreira acadêmica. E, como consequência disso, passou os sete anos seguintes à sua graduação trabalhando como funcionário no escritório de patentes em Berna, na Suíça. Mas isso acabou não sendo um grande prejuízo. No lugar de ser tolhido pelas teorias aceitas, ensinadas nas grandes universidades, Einstein agora podia se sentar em seu escritório e pensar nas implicações de suas experiências mentais da adolescência — exatamente o tipo de reflexões especulativas que Herr Professor Weber teria censurado. De início, o prosaico trabalho de escritório de Einstein, como “especialista técnico de terceira classe em período de experiência”, permitia que ele cumprisse com todas as suas responsabilidades no exame de patentes em apenas algumas horas de cada dia, deixando bastante tempo livre para conduzir suas pesquisas pessoais. Se tivesse se tornado um acadêmico em uma universidade, ele teria desperdiçado dia após dia lidando com política institucional, tarefas administrativas intermináveis e pesadas responsabilidades como professor. Em carta a um amigo, ele descreveu seu escritório como “aquele retiro secular onde desenvolvi minhas idéias mais belas”.

Esses anos como funcionário de patentes se mostrariam um dos períodos mais profícos de sua vida intelectual. Ao mesmo tempo, foi uma época bastante emotiva para o gênio em maturação. Em 1902 Einstein sofreu o choque mais profundo de toda a sua vida, quando seu pai contraiu uma doença fatal. Em seu leito de morte, Hermann Einstein deu a Albert sua permissão para que se casasse com Mileva Marié, sem saber que o casal já tinha uma filha, Lieserl. De fato, os historiadores também desconheciam a filha de Albert e Mileva até terem acesso à correspondência pessoal de Einstein no final da década de 1980. Descobriu-se que Mileva tinha retornado à sua nativa Sérvia para dar à luz, e assim que soube do nascimento de sua filha Einstein escreveu para Mileva: “Ela tem saúde e já chorar adequadamente? Que tipo de olhinhos ela tem? Com qual de nós se parece mais? Quem a está amamentando? Ela tem fome? Já tem cabelos? Eu a amo tanto e nem a conheço ainda!... Ela certamente já pode chorar,

mas só vai aprender a r Albert nunca ouviria su correr o risco da vergon Lieserl foi oferecida par

Albert e Mileva se ca nasceu no ano seguinte. dades da paternidade c Einstein finalmente con verso. Sua pesquisa teó lhos científicos publica trabalhos, ele analiso browniano e, a partir d da teoria de que a maté trabalho, ele mostrou fotoelétrico podia ser tc ca quântica. Não é de a um prêmio Nobel.

O terceiro trabalho, as idéias de Einstein da constância em relação a mentos para a física e f universo. Não era tanto tão importante, mas as c eram atordoantes até m vem, acabara de complet rimentou períodos de en como sua *teoria da relatividade*, quando a teoria c mim, fui assolado por to costumava passar seman naquela época, ainda nã primeiro choque com tai

mas só vai apreender a ritirar muito depoços. Ai está uma verdade profunda". Albert e Milieva se casaram em 1903 e seu primeiro filho, Hans Albert, nasceu no ano seguinte. Em 1905, enquanto equilibrava as responsabilidades da paternidade com suas obrigações de função nártio das patentes, Einstein finalmente conseguiu a concrétizar suas ideias a respeito do universo. Sua pesquisa teórica chegou ao clímax numa explosão de trabalhos científicos publicados no período *Annalen der Physik*. Num dos browniano, ele analisou o fenômeno conhecido como movimento browniano, a partir dali, apresentou um brilhante argumento em apoio a teoria de que a matéria é formada por átomos e moléculas. Em outro trabalho, ele mostrou que o período de formação da matéria era feito por elas, e, a partir dali, apresentou um brilhante argumento em apoio à teoria da relatividade especial. Einstein era um homem de muitos paraísos. Não era tanto o caráter constante da velocidade da era universal, mas as consequências que Einstein previa. As repercussões tão importante, mas as consequências que Einstein previa. Einstein era um professor de física e finalmente ascenderia a professor para o estudo de meninos para a física e observador. O trabalho establecia novos fundamentos para a física ao observador. Einstein era um homem de muitos paraísos. Não era tanto o caráter constante da velocidade da era universal, mas as consequências que Einstein previa. Einstein era um homem de muitos paraísos. Einstein era um homem de muitos paraísos.

O terceiro trabalho, entretanto, era ainda mais brilhante. Foste resumida as ideias de Einstein da década anterior sobre a velocidade da luz e sua constância em relação ao observador. O trabalho establecia novos fundamentos para a física e finalmente ascenderia a professor para o estudo de meninos para a física e observador. O trabalho establecia novos fundamentos para a física ao observador. Einstein era um homem de muitos paraísos. Einstein era um homem de muitos paraísos.

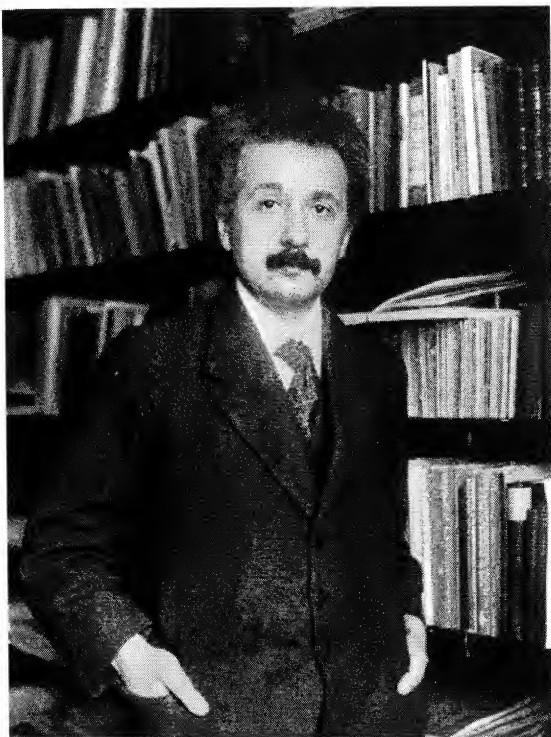


Figura 21 Albert Einstein fotografado em 1905, ano em que publicou a sua teoria da relatividade especial e firmou sua reputação.

Uma das consequências mais assombrosas da teoria da relatividade especial de Einstein é que nossa noção familiar de tempo é fundamentalmente errada. Os cientistas e os não-cientistas sempre conceberam o tempo como o avanço de algum tipo de relógio universal que tiquetaqueava sem parar, uma batida de coração cósmica, uma referência diante da qual todos os outros relógios poderiam ser acertados. O tempo seria o mesmo para todos, porque viveríamos no ritmo do mesmo relógio universal: o mesmo pêndulo oscilaria na mesma proporção hoje e amanhã, em Londres ou em Sydney, para você ou para mim. Presumia-se que o tempo era absoluto, regular e universal. Não, disse Einstein: o tempo é flexível, elástico e pessoal, assim o seu tempo pode ser diferente do meu tempo. Em particular, um relógio que se move em relação a você bate mais lentamente do que um relógio colocado

ao seu lado. Assim, se estive na plataforma da estação, o alta velocidade, eu percebe do que o meu.

Isso parece impossível, que se segue nos próximos tempo é pessoal para o ob desloca o relógio observado são bem simples, e, se você mente por que a relatividad mundo. Contudo, se pular preocupe, porque os aspect cálculo estiver completo.

Para entender o impacto ceito de tempo, vamos imag comum. Todos os relógios p gular que possa ser usado pa lante no relógio do vovô ou relógio de Alice, esse mecan dois espelhos paralelos, sep mostrado na figura 22(a). O a velocidade da luz é consta velocidade da luz é de 300.0 m/s), assim, se uma batida fe viajar de um espelho para o entre batidas é

$$\text{Tempo}_{\text{Alice}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade da luz}}$$

Alice leva seu relógio par uma velocidade constante ac de cada batida do relógio p

Alice leva seu relógio para dentro de um vagão de trem que se move com uma velocidade constante ao longo de um trilho reto. Ela vê que a durada de cada batida do relógio permanece a mesma — lembre-se de que tudo

$$\text{Tempo}_{\text{Alice}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{3,6 \text{ m}}{3,6 \text{ m/s}} = 1,2 \times 10^{-8}$$

entre batidas é vijar de um espelho para o outro e de volta, então Alice vê que o tempo m/s), assim, se uma batida for definida como o tempo para um pulso de luz velocidade da luz é de $300.000.000 \text{ m/s}$ (que pode ser escrito como $3 \times 10^8 \text{ m/s}$), assim, a velocidade da luz é constante, e assim o relógio será altamente preciso. A velocidade da luz é mostrado na figura 22(a). Os reflexos são ideias para medir o tempo que dois espelhos paralelos, separados por uma distância de 1,8 metro, como relógio de Alice, esse mecanismo é uma pulsaga de luz que é refletida entre lante no relógio do voo ou o golejar constante num relógio de água. No regular que possa ser usado para contar o tempo, assim como o pendulo oscilatório. Todos os relógios precisam de um mecanismo com uma batida regular. Além disso, vamos imaginar uma inventora, Alice, e seu relógio fora do céu de tempo, que deve entender o impacto da teoria da relatividade especial sobre o cálculo estiver completo.

Para entender o impacto da teoria da relatividade especial sobre o cálculo estiver completo, mas para Einstein era lógicamente inevitável. O tempo é pessoal para o observador e depende da velocidade com que o se segue nos próximos parágrafos é uma breve explicação de por que o tempo é pessoal para o observador se seguir a velocidade especial com que o mundo. Contudo, se pulsar a matemática ou ficar emperrado nela, não se mente por que a relatividade especial nos forçou a mudar a nossa visão de são bem simples, e, se você pudер seguir a lógica, então vai entender exatamente por que a relatividade especial é uma lógica matemática, as formulações deslocar o relógio observado. Embora haja alguma matemática, é difícil descrever o que é relatividade, eu perceberia o seu relógio funcionando mais lentamente na plataforma da estação, olhando para o seu relógio quando você passa em alta velocidade, eu perceberia o seu relógio funcionando mais lentamente ao seu lado. Assim, se estiver em um trem em movimento e eu estiver em pé que o meu.

lo que um relógio colocado articular, um relógio que se articula e pressiona, assim o seu absoluto, regular e universalmente o mesmo para todos, porque da dual todos os outros que adorava sem parar, uma oncedeuram o tempo como o tempo é fundamentalmente teoria da relatividade especial que publicou a sua teoria da



deve permanecer igual porque o princípio da relatividade de Galileu diz que deveria ser impossível para ela dizer se está parada ou em movimento pela simples observação dos objetos que viajam com ela.

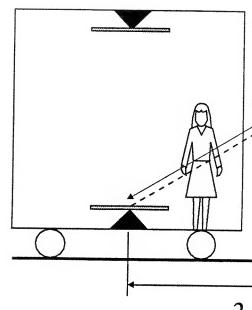
Enquanto isso, o amigo de Alice, Bob, está de pé na plataforma da estação enquanto o trem passa por ela a 80% da velocidade da luz, que é de $2,4 \times 10^8$ m/s (esse é um trem expresso no sentido mais extremo da palavra). Bob pode ver Alice e seu relógio através de uma grande janela no vagão, e do seu ponto de vista o raio de luz descreve uma trajetória em ângulo, como mostrado na figura 22(b). Ele vê a luz fazendo seu movimento normal, para cima e para baixo, mas para ele a luz também se move lateralmente, junto com o trem.

Em outras palavras, enquanto deixava o espelho inferior e chegava ao espelho superior, o relógio moveu-se para diante, de modo que a luz teve que seguir uma trajetória diagonal. De fato, da perspectiva de Bob, o trem tinha se movido para a frente 2,4 metros na ocasião em que o raio chegou ao espelho superior, o que leva a um comprimento diagonal de três metros, assim o raio de luz teve que percorrer seis metros (para cima e para baixo) entre as batidas. E como, de acordo com Einstein, a velocidade da luz é constante para qualquer observador, para Bob, o tempo entre as batidas deve ser mais longo, porque o raio de luz viaja com a mesma velocidade mas tem que percorrer uma distância maior. A percepção do tempo de Bob entre os sinais do relógio é fácil de calcular:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \frac{\text{distância}}{\text{velocidade}} = \frac{6,0 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

É nesse ponto que a realidade do tempo começa a parecer estranhíssima e um tanto perturbadora. Alice e Bob se encontram para comparar suas anotações. Bob diz que viu o relógio-espelho de Alice pulsando uma vez a cada 2×10^{-8} s, enquanto Alice afirma que seu relógio estava pulsando uma vez a cada $1,2 \times 10^{-8}$ s. Em relação a Alice, o seu relógio está funcionando perfeitamente. Alice e Bob podiam estar olhando para o mesmo relógio, mas eles percebiam a contagem do tempo acontecendo a taxas diferentes.

(a)



(b)

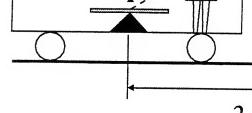


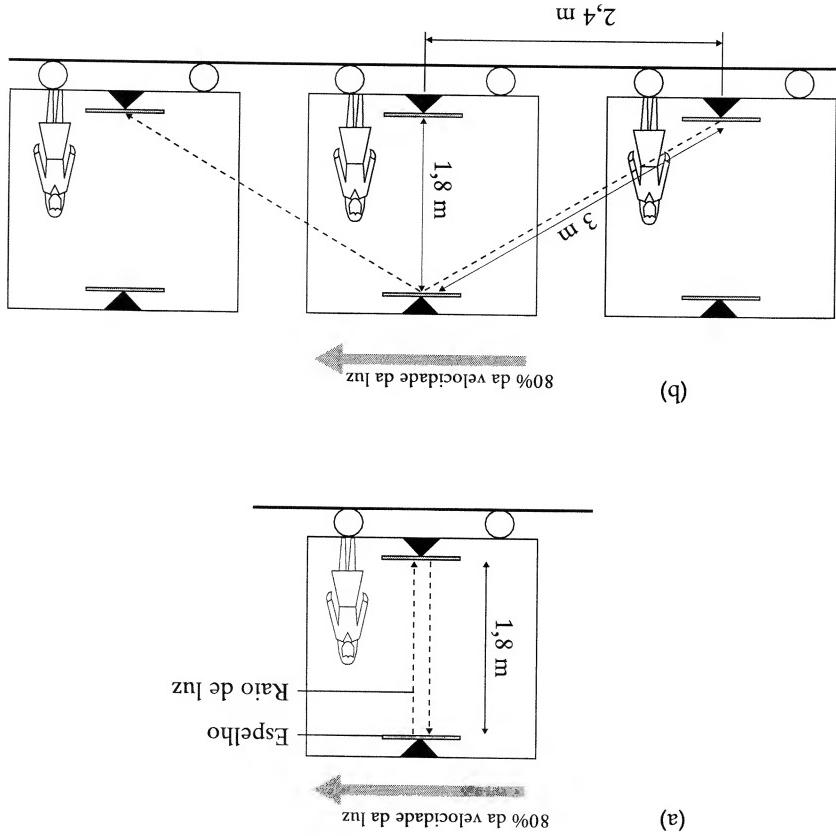
Figura 22 O cenário seguindo a relatividade especial de Einstein. Alice usa um relógio-espelho, que “bate” contra um espelho fixo no teto entre dois espelhos. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz em relação a Alice, assim ela o vê se movendo.

O diagrama (b) mostra a perspectiva de Bob. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz em relação a Alice, assim Alice o vê se movendo a 80% da velocidade da luz. Para Bob, Alice está se movendo para a direita, e o raio de luz segue uma trajetória diagonal. E, como resultado, Bob percebe que levou mais tempo para o raio de luz voltar ao relógio. Assim, ele pensa que na percepção de Alice, o tempo é menor.

O diagrama (b) mostra a mesma situação (Alice e seu relógio) da perspectiva de Bob. O vagão está se movendo a 80% da velocidade da luz, assim Bob vê o pulso de luz seguir uma trajetória diagonal. E, como a velocidade da luz é constante para todos os observadores, Bob percebe que leva mais tempo para o pulso de luz percorrer a trajetória diagonal mais longa. Assim, ele pensa que o relógio de Alice está funcionando mais lentamente do que na percepção de Alice.

Figura 22 O cenário sequestre demonstra uma das principais consequências da teoria da relatividade especial de Einstein. Alice encontra-se dentro de seu vagão de trem com seu relógio-espeelho, que “bate” com regularidade a medida que uma pulsação de luz é refletida para o lado. Assim ela vê o relógio normal, à mesma taxa de sempre.

Figura 22 O cenário segue demonstrar uma das principais consequências da terceira etapa.



TEORIAS DO UNIVERSO 111

Einstein criou uma fórmula que descreve como o tempo muda para Bob em relação a Alice sob cada circunstância:

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = \text{Tempo}_{\text{Alice}} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - v_A^2/c^2)}}$$

Esta diz que os intervalos de tempo observados por Bob são diferentes dos observados por Alice, dependendo da velocidade de Alice (v_A) relativa a Bob e a velocidade da luz (c). Se inserirmos os números apropriados no caso descrito acima, então poderemos ver como a fórmula funciona.

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - (0,8c)^2/c^2)}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 1,2 \times 10^{-8} \text{ s} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,64)}}$$

$$\text{Tempo}_{\text{Bob}} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ s}$$

Einstein certa vez brincou dizendo: "Coloque sua mão em uma chapa quente durante um minuto e vai parecer uma hora. Sente ao lado de uma linda moça durante uma hora e vai parecer um minuto. Isso é relatividade". Mas a teoria da relatividade especial não era brincadeira. As fórmulas matemáticas de Einstein descreviam de modo preciso como qualquer observador perceberia genuinamente o atraso na passagem do tempo olhando para um relógio em movimento, um fenômeno conhecido como *dilatação do tempo*. Isso parece tão absurdo que levanta imediatamente quatro questões:

1. Por que nunca notamos esse efeito?

A magnitude da dilatação do tempo depende da velocidade do relógio ou objeto em questão comparada com a velocidade da luz. No exemplo, a dilatação do tempo é significativa porque o vagão de Alice se desloca a 80% da velocidade da luz, ou seja, 240.000.000 m/s. Contudo, se o vagão estivesse viajando a uma velocidade mais razoável de 100 m/s (360 km/h), então a

percepção de Bob do . Colocando os números que a diferença na per trilhão. Em outras palavras os efeitos da dilatação c

2. Essa diferença é real?

Sim, é bem real. Existem tecnologia, que precisam funcionarem adequadamente depende de satélites como os sistemas de navegação levam em consideração os efeitos dilatadores porque os satélites cronômetros de alta prec

3. A teoria da relatividade que dependem de raios de

A teoria se aplica a todos os que acontece porque a luz é emitida em nível atômico. Portanto, os raios de um vagão se retardam do ponto de vista das interações atômicas individualmente. Isso significa que o vagão se retardaria mais lentamente, Bob a visaria e pensaria mais l

dariam. Tudo seria afetado por esta variação temporal.

4. Por que Alice não pode sentir os efeitos da dilatação do tempo?

Todos os efeitos peculiares da teoria da relatividade especial só aparecem quando o trem em movimento. Na maioria das situações, os efeitos são perfeitamente normais, porque os efeitos da dilatação do tempo só aparecem quando o trem em movimento.

4. Por que Alice não pode usar o artilhão de seu relógio e a lenteidão de seus movimentos para brouar que está se movendo?

Todos os efeitos peculiares descritos acima são observados por Bob de fora do trem em movimento. No que concerne a Alice, tudo dentro do trem é visto preferitamente normal, porque nem o seu relógio nem os outros objetos no vagão estão se movendo a ela. Movimento relativo zero significa

3. A teoria da relatividade especial de Einstein se aplica apenas a relações que dependem de raios de luz?

A teoria se aplica a todos os relógios e, de fato, a todos os fenômenos. Isto acarreca porquê a luz realmente determina as interações atômicas que acontecem no nível atômico. Portanto, todas as interações atômicas que acontecem no vácuo se retardam do ponto de vista do Bob. Ele não pode perceber essas interações atômicas individuais, mas pode ver o efeito combinado desse retardamento atômico. Além de ver o relógio-espelho de Alice pisando mais lentamente, Bob a veria acenar mais lentamente enquanto passava, ela pisaria mais lentamente, e pensaria mais lentamente, e até suas batidas de coração se retardariam. Tudo seria afetado de modo semelhante pelo mesmo grau de dilatação.

2. Essa diferença é real?

Sim, é bem real. Existem muitas pegas de equipamentos sofisticados, de alta tecnologia, que precisam levar em conta o efeito da dilatação do tempo para funcionar corretamente. O sistema de Posicionamento Global (GPS), que depende de satélites para determinar localizações por meio de aparelhos como os sistemas de navegação dos carros, só funciona com precisão porque levanta os efeitos das relativas GPS visjam a velocidades muito altas e usam nificações por parte dos satélites GPS.

Percepgao de bob do relogio de Alice seria que se iguala a percepgao de Colocando os numeros correspondentes na equagao de Einstein mostaria que a diferenca na percepcao do tempo pelo casal seria de uma parte em trilhaao. Em outras palavras, e impossivel para os seres humanos detectarem os efeitos da dilatagao do tempo no dia-a-dia.

(1-0,64)

$$1 - \frac{8c^2}{c_s^2}$$

logue sua mão em uma chapa de alumínio. Isso é relatividade". Bem cedo como qualquer observador um am do tempo olhando para um círculo como um relógio quebra um círculo como um relógio quebra um momento quebra o tempo.

$$\frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{c}$$

como o tempo muda para Bob

dilatação temporal zero. Não devemos nos surpreender que não haja dilatação de tempo, porque, se Alice notasse qualquer mudança ao seu redor, como resultado do movimento do vagão, isso contrariaria o princípio da relatividade de Galileu. Entretanto, se Alice olhasse para Bob enquanto passava zunindo por ele, a ela pareceria que Bob e seu ambiente estão sofrendo uma dilatação temporal, porque ele estaria se movendo em relação a ela.

A teoria da relatividade especial atinge outros aspectos da física de modo igualmente atordoante. Einstein mostrou que, à medida que Alice se aproxima, Bob percebe que ela se contrai na direção de seus movimentos. Em outras palavras, se Alice tem dois metros de altura e 25 centímetros da frente para trás, e está olhando para a parte dianteira do trem enquanto este se aproxima de Bob, então ele a veria com dois metros de altura mas com apenas 15 centímetros de espessura. Ela pareceria mais magra. Isso não é nada tão trivial quanto uma ilusão baseada na perspectiva, mas é de fato uma realidade na visão de Bob da distância e do espaço. É uma consequência do mesmo tipo de raciocínio que faz Bob observar o relógio de Alice funcionando mais lentamente.

Assim, além de investir contra as noções tradicionais de tempo, a relatividade especial forçava os físicos a reconsiderarem suas noções arraigadas de espaço. Em lugar de tempo e espaço serem constantes e universais, eram flexíveis e pessoais. Não surpreende que o próprio Einstein, à medida que desenvolvia sua teoria, às vezes achasse difícil confiar em sua própria lógica e conclusões. “Esse argumento é sedutor e divertido”, disse ele, “mas, pelo que sei, o Senhor pode estar rindo de mim e me fazendo andar em círculos”.

Apesar disso, Einstein superou suas dúvidas e continuou a seguir a lógica de suas equações. Depois que sua pesquisa foi publicada, os estudiosos viraram-se forçados a reconhecer que um solitário funcionário de patentes tinha feito uma das descobertas mais importantes da história da física. Max Planck, o pai da teoria quântica, disse a respeito de Einstein que “se [a relatividade] se mostrar correta, e eu espero que seja, ele será considerado o Copérnico do século XX”.

As previsões de Einstein da dilatação do tempo e da contração do comprimento foram todas confirmadas por experiências no devido tempo. Só a

sua teoria da relatividade dos físicos mais brilhantes da física vitoriana. Mas a

Logo depois de publicar num programa de rádio no contexto, Einstein criou uma “brincadeira de recompensas, contudo, revelaria como o unicórnio cosmólogo as ferramentas fundamentais imagináv

A batalha da

As idéias de Einstein e a comunidade científica aprovaram ele tivesse publicado em 1908 que recebeu um prêmio em Berna. Entre 1905 e 1909, ele obteve 10 patentes em Berna, onde era considerado “um homem de classe” e ganhou tempo para trabalhar de sua teoria da relatividade.

A teoria da relatividade geral não era apenas a situação específica de velocidade constante. Era a teoria de Einstein que previa que o trem de Alice era retíngulo, mas não com um triângulo. Consequentemente, Einstein não pôde lidar com situações de extensão da relatividade geral, porque se a

Quando Einstein fez sua teoria da relatividade geral em 1905, ele

A teoria da relatividade especial de rotulada de *especial* porquê se aplica apenas a situações especiais, aquelas nas quais os objetos se movem a uma velocidade constante. Em outras palavras, ela poderia lidar com Bob obser- vando o trem de Alice em deslocamento a uma velocidade fixa em um trilho reto, mas não com um trem que estivesse acelerado ou perdeendo velocidade. Conseqüentemente, Einstein tentou reformular sua teoria de modo que ela pudesse lidar com situações envolvendo aceleração e deceleração. Essa gran- de extensão da relatividade especial logo se tornaria conhecida como *relati- vidade geral*, porquê se aplicaria a situações mais generalizadas.

Quando Einstein fez o seu primeiro grande avanço para a criação da relatividade geral em 1907, ele o classificou como "o dia mais feliz da minha vida".

As ideias de Einstein eram tão iconoclasticas que levou tempo para que comunidade científica acolhesse esse funcionalismo público em seu meio. Em 1908 que recebeu seu primeiro posto acadêmico na Universidade de Berlim. Entre 1905 e 1908, Einstein continuou a trabalhar no escritório de patentes em Berlim, onde foi promovido a "especialista técnico de segunda classe" e ganhou tempo para prosseguir com seu esforço de estender o po- der de sua teoria da relatividade.

A batalha da gravidade: Newton versus Einstein

sua teoria da relatividade especial teria sido suficiente para fazer dele um dos físicos mais brilhantes do século XX, provocando uma revisão radical da física vitoriana. Mas a estrutura de Einstein o levaria a alturas ainda maiores. Logo depois de publicar seus trabalhos, em 1905, ele começoou a trabalhar num programa de pesquisas ainda mais ambicioso. Para colocá-lo no devído contexto, Einstein certa vez chamou sua teoria da relatividade especial uma "brincadeira de criangá" comparada com o que viria depois. As recompensas, contudo, valeriam o esforço. Sua proxima grande descoberta revelaria como o universo se compõe em grande escala e daria aos cosmólogos as ferramentas de que precisavam para abordar as questões mais fundamentais imagináveis.

vida". O que se seguiu, contudo, foram oito anos de tormento. Ele contou a um amigo como a sua obsessão com a relatividade geral o estava forçando a negligenciar todos os outros aspectos de sua vida: "Eu não tenho tempo para escrever porque estou ocupado com coisas verdadeiramente grandes. Dia e noite eu torturo meu cérebro num esforço para penetrar mais profundamente nas coisas que descobri nos dois últimos anos e que representam um avanço sem precedentes nos problemas fundamentais da física".

Ao falar em "coisas verdadeiramente grandes" e "problemas fundamentais", Einstein se referia ao fato de que a teoria da relatividade geral parecia estar conduzindo-o a uma teoria inteiramente nova da gravidade. Se Einstein estava certo, então os físicos seriam forçados a questionar o trabalho de Isaac Newton, um dos ícones da física.

Newton nasceu em circunstâncias trágicas no dia de Natal de 1642, seu pai tendo morrido três meses antes. Enquanto Isaac ainda era criança, sua mãe casou de novo com um reitor de 63 anos de idade, Barnabas Smith, que se recusou a aceitar Isaac em sua casa. Coube aos avós de Isaac a tarefa de criá-lo, e a cada ano que passava ele desenvolvia um ódio crescente em relação à mãe e ao padrasto, que o tinham abandonado. De fato, quando estudante universitário, ele fez uma lista dos pecados da sua infância, que incluía a admissão de "ameaçar meu pai e minha mãe Smith de queimá-los com sua casa".

Não surpreende que Newton se tornasse um homem amargurado, isolado e às vezes cruel. Quando foi nomeado diretor da Casa da Moeda, em 1696, ele implementou um duro regime de caça aos falsificadores, cuidando para que os condenados fossem enforcados, arrastados e esquartejados. A falsificação da moeda levara a Grã-Bretanha à beira do colapso econômico, e Newton achava que suas punições eram necessárias. Além de empregar a brutalidade, Newton usou seu cérebro para salvar a economia nacional. Uma de suas inovações mais importantes na Casa da Moeda foi a introdução de bordas serrilhadas nas moedas para combater a prática do desbaste, pela qual os falsificadores cortavam as beiradas das moedas e usavam as lascas para fazer novas moedas.

Em reconhecimento pela contribuição de Newton, a moeda britânica de duas libras, emitida em 1997, tinha a frase DE PÉ NOS OMBROS DE GIGANTES em torno de sua borda serrilhada. Essas palavras foram extraídas de uma

carta que Newton enviou escreveu: "Se pude enxer ombros de gigantes". Isso são de que as próprias idéias ilustres predecessores era uma referência velada vado. Em outras palavras, um gigante fisicamente, n

Contudo, apesar de se buição sem paralelo para mentos para uma nova e durou pouco mais de 181 como o *annus mirabilis* (mente o título de um po mais sensacionais que occ dres depois do Grande In quesa. Os cientistas, todav os verdadeiros milagres d ços em cálculo, óptica e,

Em essência, a lei da universo atrai outro obje atração entre dois objeto

A força (F) entre dois ob quanto maior a massa, m porcional ao quadrado da a força fica menor à n gravitacional (G) é sempr gravidade comparada co

O poder dessa fórm Galileu tinham tentado e

O poder dessa fórmula é que ela abrange tudo que Copérnico, Kepler e Galileu tinham tentado explicar sobre o Sistema Solar. Por exemplo, o fato

A forga (F) entre dois objetos depende das massas dos objetos (m_1 e m_2) — quanto maior a massa, maior a força. A força também é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os objetos (r^2), o que significa que a força é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os objetos (r^2), ou seja, se dobrarmos a distância entre os objetos, a força diminuirá para um quarto do valor original. A constante de gravidade compara a força gravitacional (G) com outras forças, como o magnetismo.

$$F = \frac{J^2}{m_1 \times m_2}$$

Em essência, a lei da gravidade de Newton afirma que cada objeto no universo atrai outro objeto. Mais extamente Newton definiu a força de atracção entre dois objetos quaisquer como

Contudo, apesar de seus defeitos como pessosoas, Newton fez uma contribuição sem paralelo para a ciéncia do seculo XVII. Ele estabeleceu os fundamentos para uma nova era científica com uma intensiva de pesquisas que durou pouco mais de 18 meses, culminando em 1666, que hoje é conhecido como o *annus mirabilis* (ano milagroso) de Newton. O termo era originário de um poema de John Dryden sobre outros acontecimentos mais sensacionais que ocorreram em 1666, ou seja, a sobrevivência de Londres depois do Grande Incêndio e a vitória da frota inglesa sobre a dinamarquesa. Os cíentistas, todavia, consideram que as descobertas de Newton foram os verdadeiros milagres desse ano. Seu *annus mirabilis* incluiu grandes avanços em cálculo, óptica e, o que é mais conhecido, na gravidade.

carta que Newton enviou para seu colega científico Robert Hooke, na qual escreveu: "Se pude exxergar mais longe foi porqüe fizquei de pe sobre os ombros de gigantes"; isso parece uma declaração de modestia, uma admisão que as proprias ideias de Newton tinham sido erguidas sobre as de seus ilustres predecessores, como Galileu e Pitágoras. Mas na verdade a frase era uma referência velada a ofensiva a corcunda de Hooke e seu andar curvado. Em outras palavras, Newton estava sugerindo que Hooke não era nem um gigante fisicamente, nem, por implicação, um gigante intelectual.

de uma maçã cair em direção ao solo não significa que esta queira chegar ao centro do universo, mas simplesmente que ambas, a Terra e a maçã, têm massa, e assim são atraídas naturalmente uma para a outra pela força da gravidade. A maçã acelera em direção à Terra, e ao mesmo tempo até mesmo a Terra acelera em direção à maçã, embora o efeito sobre a Terra seja imperceptível, porque esta é muito mais maciça do que a maçã. De modo semelhante, a equação da gravidade de Newton pode ser usada para explicar como a Terra orbita o Sol, porque ambos os corpos têm massa e portanto existe uma atração mútua entre eles. Novamente, a Terra orbita o Sol e não vice-versa, porque a Terra é muito menos maciça do que o Sol. De fato, a fórmula da gravidade de Newton pode até mesmo ser usada para prever que luas e planetas vão percorrer trajetórias elípticas, o que é exatamente o que Kepler demonstrou depois de analisar as observações de Tycho Brahe.

Durante séculos depois de sua morte, a lei da gravitação de Newton reinou sobre o cosmos. Os cientistas presumiam que o problema da gravidade tinha sido resolvido e usavam a fórmula de Newton para explicar tudo, do vôo de uma flecha à trajetória de um cometa. O próprio Newton, entretanto, suspeitava de que seu entendimento do universo estava incompleto: “Eu não sei como o mundo me vê, mas para mim eu tenho sido apenas um menino brincando na praia, e me divertindo aqui e ali ao encontrar uma pedra mais polida ou uma concha mais bonita do que as outras, enquanto o grande oceano da verdade permanece desconhecido diante de mim”.

E foi Albert Einstein quem primeiro percebeu que poderia existir mais coisas na gravidade do que Newton imaginara. Depois do seu próprio *annus mirabilis* em 1905, quando Einstein publicou vários trabalhos históricos, Einstein concentrou-se em ampliar sua teoria da relatividade especial para uma teoria geral. Isso envolvia uma interpretação radicalmente diferente da gravidade baseada em uma visão diferente de como os planetas, as luas e as macãs se atraem uns aos outros.

No cerne da nova abordagem de Einstein estava a descoberta de que a distância e o tempo são flexíveis, o que era uma consequência da sua teoria da relatividade especial. Lembrem-se de que Bob vê um relógio andando mais devagar e Alice ficando mais magra à medida que se movem em sua direção. Assim, o tempo é flexível, assim como as três dimensões do espaço

(largura, altura e profundidade como do tempo são indúncia entidade flexível coiflexível se revelou a causanha flexibilidade é sem dúvida maneira razoavelmente gravidade.

O espaço-tempo é forte de tempo, o que é inimaginável é mais fácil considerar a na figura 23. Felizmente as características-chave do aplanificação conveniente. A figura-tempo) é como um pedaço de madeira que, se nada estiver, é imperturbável. A figura é bastante se um objeto for capaz de representar o espaço se elástica curvando-se sob o

De fato, a analogia da bolha representa o Sol, pode ser lançada em órbita bola de tênis na verdade carrega enquanto circula. Síriamos tentar rolar uma bolha de tênis fazendo-a girar ao seu redor, e elas se moveriam em torno do fosso.

Na prática, qualquer tecido colocado sobre uma cama elástica logo descreve o movimento natural dos objetos. Assim, é naturalmente esse tipo de efeito de se observar no espaço-tempo. De acordo com o que testemunhavam fenômenos que estavam realmente vendo.

Na prática, qualquer tentativa de modelar um sistema complicado em uma cama elástica logo desmorona devido à fricção do tecido que agita o movimento natural dos objetos. Não obstante, Einstein afirmava que extra-mente esse tipo de efeito de cama elástica estava acontecendo no tecido do espaço-tempo. De acordo com Einstein, sempre que os físicos estavam realmente realizando experimentos envolvendo a forma da curvatura do espaço-tempo.

De fato, a analogia da cama elástica pode ser estendida. Se uma bola de boleche representa o Solo, então uma bola de ténis representando a Terra pode ser largada em órbita ao redor dela, como mostrado na figura 23(c). A bola de ténis na verdaade cira sua própria depressão na cama elástica e a carega endeuanto circula. Se quisessemos um modelo da Lua, então pode-ramos tentar rolar uma bolinha de gude na depressão causada pela bola de ténis fazendo-a girar ao seu redor endeuanto a bola de ténis é sua concavidade. De fato, a analogia da cama elástica pode ser estendida. Se uma bola de boleche representa o Solo, então uma bola de ténis representando a Terra pode ser largada em órbita ao redor dela, como mostrado na figura 23(c). A bola de ténis na verdaade cira sua própria depressão na cama elástica e a carega endeuanto circula. Se quisessemos um modelo da Lua, então pode-ramos tentar rolar uma bolinha de gude na depressão causada pela bola de ténis fazendo-a girar ao seu redor endeuanto a bola de ténis é sua concavidade.

O espaço-tempo é formado por quatro dimensões, três de espaço e uma de tempo, o que é inimaginável para a maioria dos mortais, assim, geralmente é mais fácil considerar apenas duas dimensões de espaço, como mostrado na figura 23. Felizmente esse espaço-tempo rudimentar ilustra muitas das características-chave do autêntico espaço-tempo, de modo que é uma sim-
plificação conveniente. A figura 23(a) mostra que o espaço (de fato, o espa-
ço-tempo) é como um pedaço de tecido esticado, e a grade de linhas ajuda a mostar que, se nada estiver ocupando o espaço, então seu "tecido" é plano e impermeável. A figura 23(b) mostra como o espaço bidimensional muda bastante se um objeto for colocado sobre ele. Foste segundado diagrama pode-
ria representar o espaço senado torcido por um Sol maciço, como uma cama elástica curvando-se sob o peso de uma bola de boliche.

(largura, altura e profundidade). Além disso, as flexibilidades tanto do espaço quanto do tempo são indissociáveis, o que leva o Einstein a considerar uma unica entidade flexível conhecida como espaço-tempo. Ele esse espaço-tempo que como razão de sua extensão revelou a causa subjacente à gravidade. Essa progressão de estrelas flexíveis se revelou a causa subjacente à gravidade. Essa progressão de estrelas flexíveis é razoavelmente fácil de visualizar a filosofia de Einstein para a gravidade.

Lei da gravitação de Newton im que o problema da gravida-
le Newton para explicar tudo,
o universo estava incompleto:
mim eu tenho sido apena um
a aqui e ali ao encontrar uma
a do que as outras, enquanto o
que cedo diaante de mim".

Depois do seu próprio *annus*
ou vários trabalhos históricos,
a da relatividade especial para
igão radicalmente diferente da
como os planetas, as luas e as
estava a descoberia de que a
ma consequência da sua teoria
Bob ve um relgio andando
medida que se move em sua
io as três dimensões do espaço

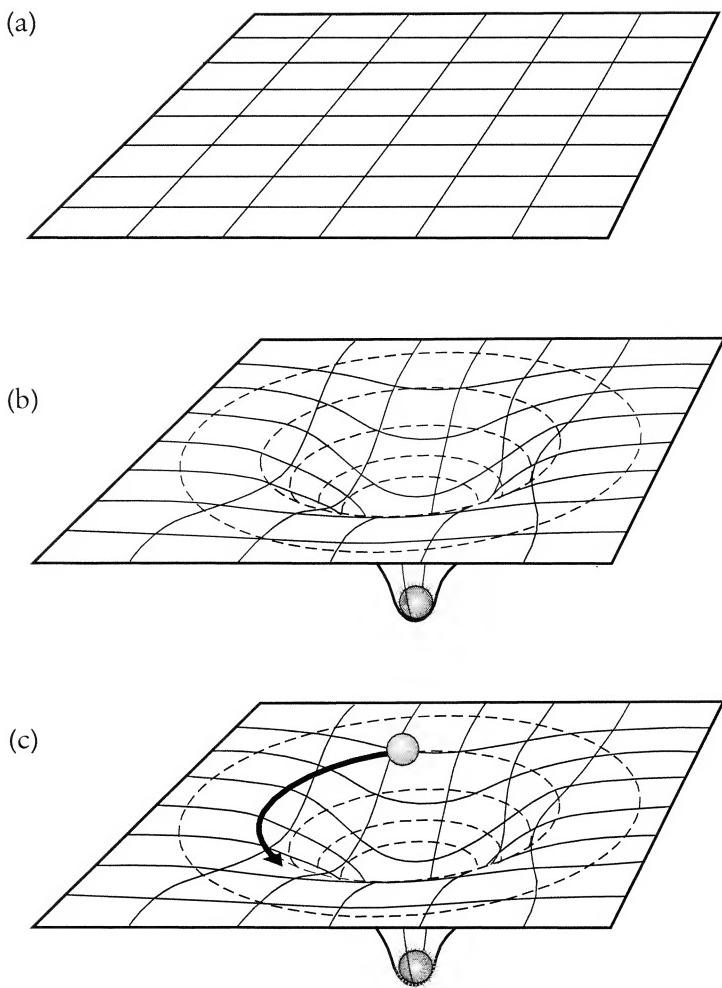


Figura 23 Estes diagramas são representações bidimensionais do espaço-tempo quadridimensional, ignorando uma dimensão de tempo e uma de espaço. O diagrama (a) mostra uma tela chata, lisa, não perturbada, representando o espaço vazio. Se um planeta passasse por este espaço, ele seguiria em uma linha reta.

O diagrama (b) mostra o espaço torcido por um objeto como o Sol. A profundidade da depressão depende da massa do Sol.

O diagrama (c) mostra um planeta orbitando a depressão causada pelo Sol. O planeta provoca sua própria pequena depressão no espaço, que é demasiado pequena para ser representada neste diagrama porque o planeta é relativamente leve.

Por exemplo, Newton diria que a força de atração gravitacional é proporcional ao quadrado do distanciamento profundo do que o planeta caía no solo porque estava vinculado pela massa da Terra.

A presença de objetos reais é de mão dupla. A forma do espaço-tempo é, e, ao mesmo tempo essa forma é criada pelo espaço-tempo. Em outras palavras, o Sol e os planetas são causa e efeito. Wheeler, um dos principais defensores do dito: “A matéria diz ao espaço como se mover”. Embora esta concisão (“espaço” deveria ser “espacotempo”) seja parte da teoria de Einstein.

Essa noção de espaço-tempo curvado havia sido convencido de que era puramente critérios estéticos, o que entendeu que a teoria era verdadeira, ou, como lhe perguntou a mim naquele dia, “é essa a maneira como o mundo é desse modo”. Entretanto, Einstein respondeu: “É que estava certo, tinha que ser assim”. Sua teoria. Seu maior desafio era explicar a curvatura do espaço-tempo e gravidade descritas na teoria da relatividade geral, colocada em uma rigidez matemática.

Einstein levaria oito anos para fundamentar sua intuição com cálculos matemáticos. Durante esse período, ele se sentiu frustrado por períodos em que seus cálculos eram incorretos. Levaria Einstein à beira de um ataque de apoplexia. As crises de sua frustração são reveladas em cartas que ele escreveu para os amigos durante esse período. Ele precisava me ajudar ou eu precisava trabalhar na relatividade era a pergunta que ele fazia.

trabalhar na relatividade era como suportar "uma chuva de logo e enxofre". Precisa me ajudar ou eu vou ficar maluco!". A Paul Ehrenfest ele disse que para os amigos durante esses anos. Ele impôrou a Marcel Grossmann: "Você de sua frustação só revelados nos breves comentários que ele fez em cartas levaria Einstein à beira de um colapso nervoso. Seu estado mental é o nível períodos em que seus cálculos pareciam se desfazer. O esforço intelectual co. Durante esse período, enfrentou grandes obstáculos e teve que suportar fundamental sua intuição com um argumento matemático de lógica fundamentar sua teoria da relatividade especial antes que pudesse Einstein levaria oito anos de árdua pesquisa teórica antes que pudesse

geral, colocada em uma rigorosa estrutura matemática. Go-tempo e gravidade descrita acima em uma teoria formal da relatividade teoria. Seu maior desafio era transformar uma noção um tanto vaga de espaço que estava certo, tinha que desenvolver uma fórmula que englobasse sua desse modo". Entretanto, Einstein precisava convencer o resto do mundo de teoria, eu perguntei a mim mesmo se, caso eu fosse Deus, teria feito o mundo ser verdadeiro, ou, como Einstein resumiu: "Quando estou julgando uma certeza estética, o elô entre o espaço-tempo flexível e a gravidade tinha de estar a convenção de que era certa. De acordo com seu princípio conjunto de

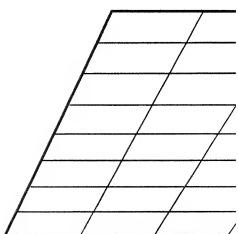
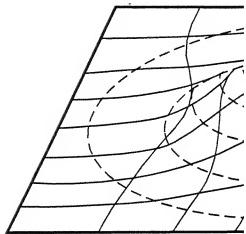
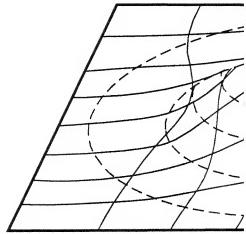
Essa noção de espaço-tempo flexível pode parecer maluca, mas Einstein teoria de Einstein.

conclusão ("espaço" deveria ser "espaço-tempo"), ainda é um bom resumo da ria como se mover". Embora Wheeler tivesse sacrificado a precisão pela com o dito: "A matéria diz ao espaço como se curvar; e o espaço diz à matéria Wheeler, um dos principais relativistas gerais do século XX, resumiria a teoria o Sol e os planetas são causadas pelo mesmo Sol e pelos planetas. John go-tempo. Em outras palavras, as concavidades no espaço-tempo que guiam os, e, ao mesmo tempo esses mesmos objetos influenciam a forma do espaço-mão dupla. A forma do espaço-tempo influencia o movimento dos objetos, e presenta de objetos no espaço-tempo da origem a um relacionamento

A presença de objetos no espaço-tempo é originada por uma força gravitacional que age sobre o espaço-tempo, deformando-o. Essa força é exercida por todos os corpos que possuem massa. A intensidade da força depende da massa e da distância entre os corpos. A deformação do espaço-tempo é proporcional à intensidade da força gravitacional. Assim, quanto maior a massa de um corpo, maior a deformação que ele causa no espaço-tempo. Por exemplo, Newton diria que uma massa caiu no solo porque existia uma

relativamente leve. Depressão causada pelo Sol. O planeta é de maneira pequena para logo, que é espelho vazio. Se um objeto como o Sol. A profundidade da dimensão do espaço-tempo é uma linha reta.

representando o espaço vazio. O diagrama ilustra que o espaço-tempo é uma dimensão do espaço-tempo que é uma linha reta.



Em outra carta, ele se afligia por “novamente ter perpetrado alguma coisa na teoria da gravitação que me arrisca a ser confinado num hospício”.

A coragem necessária para essa aventura em território intelectual não mapeado não deve ser subestimada. Em 1913, Max Planck aconselhou Einstein a não trabalhar na relatividade geral. “Como um velho amigo eu devo aconselhá-lo contra isso, primeiro porque não terá sucesso e, se tiver, ninguém acreditará em você.”

Einstein perseverou, suportou a provação e finalmente completou sua teoria da relatividade geral em 1915. Como Newton, Einstein por fim desenvolvera uma fórmula matemática para explicar e calcular a força da gravidade em todas as situações concebíveis, mas a fórmula de Einstein era bem diferente e montada sobre uma premissa completamente independente — a existência do espaço-tempo flexível.

A teoria da gravidade de Newton fora suficiente para a física dos dois séculos anteriores, assim, por que os físicos deveriam abandoná-la subitamente em troca da nova teoria de Einstein? A teoria de Newton podia prever com sucesso o comportamento de tudo, de maçãs a planetas, de balas de canhão a gotas de chuva, assim, para que servia a teoria de Einstein?

A resposta se encontra na natureza do avanço científico. Os cientistas tentam criar teorias para explicar e prever os fenômenos naturais de modo tão preciso quanto possível. Uma teoria pode funcionar satisfatoriamente durante alguns anos, décadas ou séculos, mas os cientistas acabam desenvolvendo e adotando uma teoria melhor, uma que seja mais precisa, que funcione em uma variedade maior de situações, ou que explique fenômenos antes inexplicados. Foi o que aconteceu com os antigos astrônomos e seu entendimento da posição da Terra no cosmos. Inicialmente os astrônomos acreditavam que o Sol orbitava uma Terra estacionária, e graças aos epiciclos e deferentes de Ptolomeu, esta era uma teoria razoavelmente bem-sucedida. De fato, os astrônomos a utilizavam para prever os movimentos dos planetas com uma precisão razoável. Contudo, a teoria centrada na Terra acabou sendo substituída por uma teoria do universo centrado no Sol, porque esta nova teoria, baseada nas órbitas elípticas de Kepler, era mais precisa e podia explicar as novas observações telescópicas, como as fases de Vênus. Foi uma transição longa e difícil de uma teoria para a outra.

tra, mas, uma vez que havia caminho de volta,

Do mesmo modo, iria melhor da gravidade particular, Einstein suspeitava que falhar em determinadas sucedida em todas as situações daria resultados incorretos, e a teoria da gravidade seria estabelecida. Einstein tentou e testar ambas, acreditasse a realidade da teoria da gravidade.

O problema para Einstein é que, mesmo nível de gravidade, eram igualmente bem-sucedidas. Ele percebeu que, de modo a encontrar expor as falhas na teoria, um tremendo campo gravitacional de Mercúrio, sentia-se atraído pelo Sol de um modo que não havia sido previsto. Em 18 de fevereiro de 1919, precisava — um caso raro — que a teoria da gravidade havia sido confirmada décadas.

Em 1859, o astrônomo Urbain Le Verrier notou uma anomalia na órbita de Mercúrio, que não podia ser explicada pela teoria newtoniana. Em vez de ser fixa, a órbita do planeta Mercúrio se deslocava lentamente, de forma que o planeta não voltava ao mesmo ponto da órbita a cada 24 horas. A órbita elíptica de Mercúrio era mais alongada do que a órbita elíptica de Júpiter, que é praticamente circular. A órbita elíptica de Mercúrio é mais alongada do que a órbita elíptica de Júpiter, que é praticamente circular.

Os astrônomos tinham

Do mesmo modo, Einstein acreditava estar fornecendo à física uma teoria melhor da gravidade, mais precisa e mais proxiima da realidade. Em particular, Einstein suspeitava que a teoria da gravidade de Newton poderia falhar em determinadas circunstâncias enduante sua própria teoria seriam superadas as situações. De acordo com Einstein, a teoria de Newton sucedida em todas as situações. De acordo com Einstein, a teoria de Newton daria resultados incorretos ao prever fenômenos em situações em que a força da gravidade seria extremamente forte. Portanto, de modo a provar que estava certo, Einstein tinha apenas que encontrar um desses cenários extremamente rarambas, a sua teoria da gravidade é a de Newton. A teoria que imitasse a realidade de modo mais preciso venceria a competição e seria a verdadera teoria da gravidade.

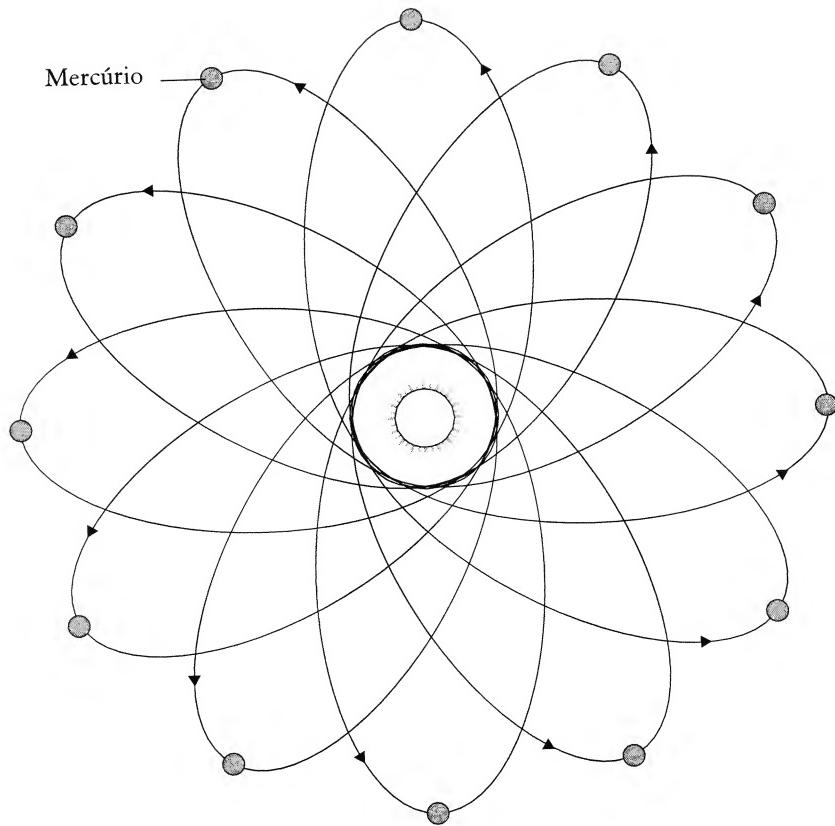


Figura 24 Os astrônomos do século XIX ficaram intrigados com um desvio da órbita de Mercúrio. Este é um diagrama exagerado, já que a órbita de Mercúrio é menos elíptica (ou seja, mais circular) e o Sol está mais perto do centro da órbita. E, o que é mais importante, a torção da órbita foi exagerada. Na realidade, cada órbita avança apenas $0,00038^\circ$ em relação à anterior. Quando lidam com ângulos muito pequenos, os cientistas usam minutos e segundos em lugar de graus:

$$\begin{aligned}1 \text{ minuto} &= 1/60^\circ \\1 \text{ segundo} &= 1/60 \text{ minuto} = 1/3.600^\circ\end{aligned}$$

Assim, cada órbita de Mercúrio avança aproximadamente $0,00038^\circ$ ou $0,023$ minutos, ou 1.383 segundos com relação à órbita anterior. Mercúrio leva 88 dias para orbitar o Sol, assim, depois de um século na Terra, Mercúrio completa 415 órbitas e sua órbita avançou de $415 \times 1.383 = 574$ segundos.

Mercúrio era causado pela teoria Solar dando puxões e gravidade de Newton, Le Verrier explicava apenas 5 planetas inexplicados. De acordo com a teoria extra, invisível na órbita de Mercúrio de asteróides ou uma liga sugeriram a existência de um planeta que ficaria entre Mercúrio e Marte. Eles miraram que a fórmula da gravidade devia estar na incapacidade envolvidos. Assim que tiveram a resposta certa de 574 segundos.

Einstein, por sua vez, também não conseguiu explicar o desvio da órbita de Mercúrio ou cinturão de asteróides. A fórmula da gravidade de Newton era perfeitamente adequada em termos de descrição da órbita da Terra, mas Einstein estava lutando com as extremas contradições nas suas teorias. A segurança de Newton. Esta era a questão: qual das duas teorias rivais e Einstein precisaria mudar?

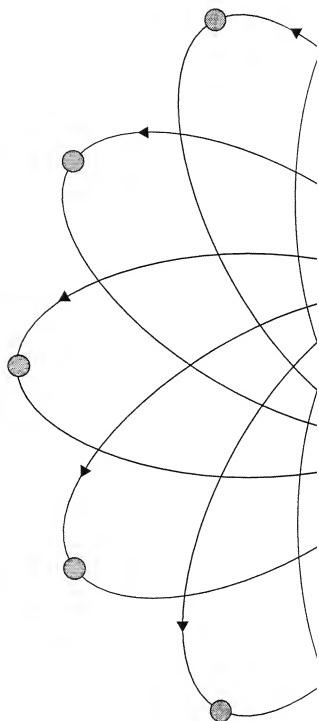
Fez os cálculos necessários e foram 574 segundos de arrependimento. "Por alguns dias eu fiquei triste, mas finalmente creveu."

Por azar, a comunidade científica não aceitou as razões emocionais de Einstein. As razões conservadoras, como já vimos, eram mais fortes. Se uma teoria tem que ser abandonada, é preciso conciliar com a nova teoria.

completa 415 órbitas e sua órbita completa 0,00038° ou 0,023 minutos, ercrito leva 88 dias para orbitar o

$1/3.600$

ingulos muito pedregosos, os cientes aliadade, cada órbita avanga apena centro da órbita. E, o que é mais órbita de Mercúrio e meses elíptica tagados com um desvio da órbita de



conciliar com a nova teoria. Tal como gão só se justifica se a comunidade tem que ser abandonada, e o que resta da estrutura científica tem que se razões emocionais. Se uma nova teoria derrobar uma antigá, a velha teoria conservadoras, como já vimos, em parte por motivos práticos e em parte por com os cálculos de Einstein. As instituições científicas são imponentemente

Por azar, a comunidade científica não estava interamente convencida

creveu.

"Por alguns dias eu fiquei fora de mim com a alegría e a exultagão", es-foram 574 segundos de arco, o que estava de acordo com as observações.

Fez os cálculos necessários usando sua própria fórmula e o resultado

precisão a mudançá na órbita de Mercúrio.

duas teorias rivais e Einstein esperava que sua própria teoria explicasse com gurangá de Newton. Esta era a arena perfeita para a competição entre as extremas encontradas nas proximidades do Sol estavam fora da área de se-Terra, mas Einstein estava convencido de que as condições gravitacionais formula da gravidade de Newton. A teoria de Newton funcionava perfeita-mente em termos de descrever o que acontecia na gravidade mais fraca da Terra ou cinturão de asteroides desconhecido, e que o problema estava na

Einstein, por sua vez, tinha certeza de que não existia nenhum planeta,

resposta certa de 574 segundos de arco.

nhecidio, a lúa ou o planeta, elles trivessem encontrado o cinturão de asteroides desco-evolvidos. Assim que tivessem encontrado todos os fatores ma devia estar na incapacidade delas de considerar correta e que o proble-miram que a fórmula da gravidade de Newton estavam corretas os astromes presu-que ficaria entre Mercúrio e o Sol. Em outras palavras, os vulcânicos sugeriram a existência de um planeta ainda não descoberto, chamado Vulcano, prior de asteroides ou uma lúa desconhecida de Mercúrio. Alguns ate mesmo extra, invisível na órbita de Mercúrio, como por exemplo um influenciado inexplicados. De acordo com algumas estudos de arco ficavam tecia a cada século. Isto significava que 43 segundos de arco que acor-planetas explicava apena 531 dos 574 segundos de arco da torgão que acor-

Mercúrio era causado pela atração gravitacional dos outros planetas do Sis-

estiver plenamente convencida de que a nova idéia de fato funciona. Em outras palavras, o ônus da prova sempre fica com os advogados da nova teoria. A barreira emocional contra a aceitação é igualmente alta. Os velhos cientistas, que tinham passado suas vidas acreditando em Newton, estavam naturalmente relutantes em descartar aquilo que conheciam e em que confiavam em troca de alguma teoria recém-chegada. Mark Twain fez uma observação perspicaz ao dizer: “Um cientista jamais mostra afeição por uma teoria que ele mesmo não tenha apresentado”.

Não surpreende que a comunidade científica se agarrasse à visão de que a fórmula de Newton estava certa e de que os astrônomos cedo ou tarde descobririam algum novo corpo celeste que explicaria o desvio orbital de Mercúrio. Quando uma observação mais precisa não revelou nenhum sinal de um cinturão de asteróides interior, ou de uma lua ou planeta, os astrônomos então ofereceram outra solução para salvar a agonizante teoria de Newton. Fazendo uma pequena mudança na equação de Newton de r^2 para $r^{2.00000016}$, eles poderiam de certa forma salvar a abordagem clássica e explicar a órbita de Mercúrio:

$$F = \frac{G \times m_1 \times m_2}{r^{2,00000016}}$$

Isso contudo era apenas um truque matemático. Sem respaldo na física, tratava-se de um esforço desesperado para salvar a teoria da gravidade de Newton. De fato, tais manipulações eram um sinal do tipo de lógica desligada da realidade que antes levara Ptolomeu a acrescentar mais círculos à visão equivocada do universo centrado na Terra e cheio de epiciclos.

Se ia superar esse conservadorismo, vencer seus críticos e depor Newton, Einstein tinha que reunir mais provas a favor de sua teoria. Precisava encontrar outro fenômeno que pudesse ser explicado apenas pela sua teoria e não pela de Newton. Alguma coisa tão extraordinária que fornecesse uma prova irrefutável e inequívoca a favor da gravidade de Einstein, da relatividade geral e do espaço-tempo.

Se uma nova teoria científica testes críticos. Primeiros correspondam a todas as gravitacional de Einstein coisas tinha indicado exatamente o que Mercúrio. O segundo teste prever os resultados de observações, então esta será uma grande prova. Quando Kepler e Galileu guiaram passar rapidamente teóricos que correspondem ao resultado. Contudo, o segundo teste das fases de Vênus correu há décadas.

O motivo pelo qual convencer os incrédulos é gerar o resultado certo. (ela concorde com o resultado de Alice. Ambos afirmam ter Bob tenta convencê-lo de do mercado de ontem, e as cotações com perfeição. o mercado amanhã. E 2º Com quem você vai investir é claro, a suspeita de que l aos resultados do dia anterior teoria não é inteiramente comportamento do mercado realmente.

Se uma nova teoria científica quiser ser levada a sério, precisa passar por dois testes científicos. Primeiro, precisa produzir resultados teóricos que correspondam a todos os observações existentes da realidade. A teoria gravitacional de Einstein tinha passado por esse teste, porque entre outras coisas tinha indicado exatamente a quantidade certa de desvio na órbita de Mercúrio. O segundo teste, que é ainda mais rígido, é de que a teoria deve prever os resultados de observações que ainda não foram feitas. Quando os cientistas fizem essas observações, se elas correspondem às previsões teóricas, então esta será uma evidência determinante de que a teoria é correta.

Quando Kepler e Galileu afirmaram que a Terra orbitava o Sol, elas conseguiram passar rapidamente no primeiro teste, que era produzir resultados que correspondessem aos movimentos conhecidos dos planetas. Contudo, o segundo teste só foi vencido quando as observações de Galileu das fases de Vênus correspondaram à previsão teórica feita por Copérnico.

O motivo pelo qual o primeiro teste só tinha não é suficiente para convencer os incrédulos é o medo de que a teoria tenha sido ajustada para gerar o resultado certo. Contudo, é impossível ajustar uma teoria para que venha a coincidir com o resultado certo. Imagine que você pensando em observar o sol nascendo ou se pondo, ou o planeta Marte se aproximando ou afastando do sol. Se a teoria só é ajustada para que o resultado seja certo, ela concorda com o resultado certo. Contudo, se a teoria é ajustada para que o resultado seja certo, ela observa o sol nascendo ou se pondo, ou o planeta Marte se aproximando ou afastando do sol.

As fases de Vênus correspondiam à previsão teórica feita por Copérnico. Quando Kepler e Galileu afirmaram que a Terra orbitava o Sol, elas conseguiram passar rapidamente no primeiro teste, que era produzir resultados que correspondessem aos movimentos conhecidos dos planetas. Entretanto, o segundo teste só foi vencido quando as observações de Galileu das fases de Vênus correspondaram à previsão teórica feita por Copérnico.

Ao longo de séculos, a teoria de que a Terra orbitava o Sol se tornou a teoria dominante da astronomia. No entanto, existiam algumas exceções. Por exemplo, a teoria de que a Terra orbitava o Sol não explicava o desvio orbital de Júpiter. Os astrônomos tentaram ajustar a teoria para que o resultado fosse certo, mas isso só resultou em mais erros. Por exemplo, a teoria de que a Terra orbitava o Sol não explicava o desvio orbital de Júpiter. Os astrônomos tentaram ajustar a teoria para que o resultado fosse certo, mas isso só resultou em mais erros.

A parceria decisiva Teoria e experiência

De modo semelhante, se Einstein ia provar que estava certo e que Newton estava errado, ele teria que usar sua teoria para fazer uma previsão firme sobre um fenômeno ainda não observado. É claro que este fenômeno teria que acontecer num ambiente de gravidade extrema, de outro modo as previsões newtonianas e einsteinianas coincidiriam e não haveria vencedor.

No final, o teste decisivo seria um fenômeno envolvendo o comportamento da luz. Antes mesmo de aplicar sua teoria a Mercúrio — de fato, mesmo antes de terminar o desenvolvimento de sua teoria da relatividade geral —, Einstein tinha começado a explorar a interação entre a luz e a gravidade. De acordo com a sua formulação da gravidade no espaço-tempo, qualquer raio de luz que passasse por uma estrela ou um planeta maciço seria atraído pela força gravitacional em direção a essa estrela ou a esse planeta, e a luz seria levemente desviada de sua trajetória original. A teoria da gravidade de Newton também previa que objetos pesados poderiam curvar a luz, mas numa extensão menor. Conseqüentemente, se alguém pudesse medir o desvio da luz por um corpo celeste maciço, o resultado, se o desvio era pequeno ou muito pequeno, determinaria quem estava certo, Einstein ou Newton.

Já em 1912, Einstein começara uma colaboração com Erwin Freundlich sobre como fazer a medida crucial. Enquanto Einstein era físico teórico, Freundlich era um astrônomo profissional e portanto se encontrava em posição melhor para dizer como alguém poderia fazer observações que detectassem o desvio óptico previsto pela relatividade geral. Inicialmente, eles se perguntaram se Júpiter, o planeta mais denso do Sistema Solar, poderia ser grande o suficiente para curvar a luz de uma estrela distante, como mostrado na figura 25. Mas, quando Einstein fez os cálculos, usando sua fórmula, ficou claro que o desvio causado por Júpiter seria muito tênué para ser detectado, ainda que o planeta tenha trezentas vezes a massa da Terra. Einstein escreveu para Freundlich: “Se ao menos a natureza nos desse um planeta maior do que Júpiter!”

Em seguida eles se voltaram para o Sol, que é mil vezes mais denso do que Júpiter. Dessa vez os cálculos de Einstein mostraram que a atração gravitacional do Sol teria uma influência significativa sobre um raio de luz de uma estrela distante e que a curvatura da luz seria detectável. Por exem-



Figura 25 Einstein estava inum planeta maciço o suficiente no espaço-tempo. O diagrama cruza o espaço. A trajetória plana se Júpiter não estivesse pela torção espacial de Júpiter é muito pequeno pa

plo, se a estrela estivesse na linha de visão, nós não o veríamos. Contudo, a imensa massa do Sol desviariam a luz da estrela, que ainda estaria desviada da posição real para indicar quem estava certo. O desvio ainda menor que

Mas há um problema: como a aparecer bem no céu? O brilho do Sol. De fato, de estrelas, mas todas parecem comparado ao do Sol. Cada estrela do Sol se revelam. Em vez disso, que eles procurassem pe

que elas procurassem pelos desvios estelares durante um eclipse total do Sol. Do Sol se revelam. Em 1913, Einstein escreveu para Freudlich sugerindo comparado ao do Sol. Contudo, existe uma ocasião em que as estrelas além de estrelas, mas todas permanecem invisíveis porque seu brilho é desprezível mesmo brilho do Sol. De fato, a região em torno do Sol extra sempre se aplica a modo a aparecer bem na sua berlada extra impossível de ver devido ao tremor.

Mas há um problema: uma estrela cuja luz fosse desviada pelo Sol de

desvio ainda menor que o da fórmula de Einstein.

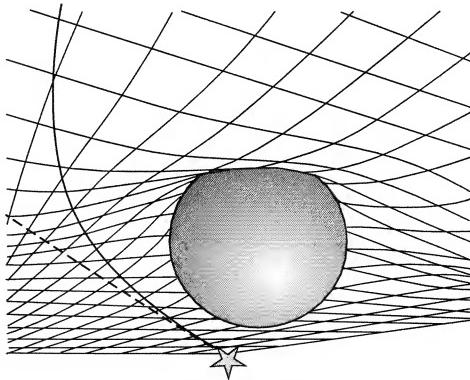
para indicar quem estaria certo, porque a fórmula de Newton previa um desvio da posição real para a aparente seria muito pequeno, mas o suficiente estrela, que ainda estaria atrás do Sol, pareceria estar bem ao seu lado. O tempo desviaria a luz da estrela na direção da Terra, tornando-a visível. A 26. Contudo, a imensa força gravitacional do Sol e a força do espaço-

linha de visão, não deviamos vê-la da Terra, como mostrado na figura

pelo, se a estrela estivesse por trás da borda do Sol, portanto fora da nossa

Júpiter é muito pequeno para ser detectado.

Figura 25 Einstein estava interessado na possível curvatura da luz das estrelas por Júpiter, pela teoria espacial de Júpiter. Infelizmente para Einstein, o desvio da luz estrelar por planeta mágico ou suficiente para produzir uma concavidade profunda no tecido do espaço-tempo. O diagrama mostra uma estrela distante emitindo um raio de luz que caiu a um ângulo muito maior que o que Einstein previu. A teoria da trajetória reta mostra como a luz teria se deslocado através do espaço-



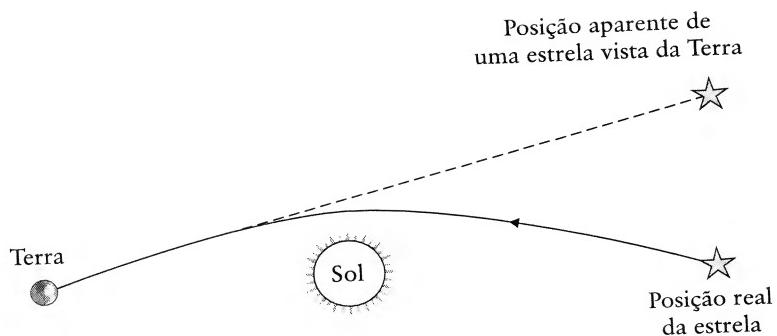


Figura 26 Einstein esperava que a curvatura da luz estelar pelo Sol pudesse ser usada para comprovar sua teoria da relatividade geral. A linha de mira entre a Terra e a estrela distante é bloqueada pelo Sol, mas a massa do Sol distorce o espaço-tempo e a luz estelar é desviada para seguir uma trajetória curva em direção à Terra. Nosso instinto nos diz que a luz viaja em linha reta, assim, da Terra, nós projetamos a trajetória da luz de volta ao longo da linha reta que ela deve ter percorrido e parece que a estrela mudou de posição. A teoria da gravidade de Einstein previa um desvio estelar aparente maior do que o previsto pela teoria da gravidade de Newton, assim, a medição do desvio indicaria qual teoria da gravidade era a correta.

Quando a Lua tampa o Sol durante um eclipse, o dia temporariamente se transforma em noite e as estrelas aparecem. O disco da Lua se encaixa sobre o do Sol tão perfeitamente que é possível identificar uma estrela a apenas uma fração de grau da borda do Sol — ou melhor, uma estrela cuja luz foi desviada de modo que ela *parece* estar uma fração de grau fora do disco solar.

Einstein esperava que Freundlich pudesse examinar fotografias de eclipses passados para encontrar as mudanças nas posições necessárias que provassem sua fórmula da gravidade, mas logo ficou claro que dados de segunda mão não seriam suficientes. A exposição e o enquadramento das fotos teriam que ser perfeitos para detectar pequenas mudanças nas posições das estrelas, e as fotografias de eclipses passados não correspondiam às expectativas.

Havia apenas uma opção. Freundlich teria que montar uma expedição para fotografar o próximo eclipse solar, que seria observável da Criméia em 21 de agosto de 1914. A reputação de Einstein dependia dessa observação,

por isso ele estava preparado. Ficou tão obcecado com os cálculos e os erros. Mais tarde, a viúva de Einstein, já que elas teriam vidas diferentes.

Freundlich partiu de Berlim para a Criméia. Sabemos agora que foi um erro. Ferdinand tinha eventos que levariam à morte. Freundlich chegou à Rússia com seus telescópios para o Reino Unido. Alemanha tinha declarado guerra à Rússia. Os alemães carregando telescópios para a Criméia estavam perdidos. E sua equipe tinha sido capturada. As coisas, eles foram derrotados. Um fracasso completo. Sionado um grupo de oficiais para uma troca de prisioneiros em Berlim, no dia 2 de setembro de 1914.

Essa iniciativa mal sucedida para marcar o avanço na física da gravidade parou, já que toda a Europa, e muitas das jovens como voluntários para a guerra, já era um nome familiar. Fazendo parte de uma das maiores batalhas da história: a Batalha de Galípoli. Aliadas que atacavam o Egito e condições em Galípoli: “mosquitos, mas moscas na comida”. Ao alvorecer, os turcos iniciaram um ataque que

Essa iniciativa malucida simbolizou o modo a guerra tria para-
lizar o avanço na física e na astronomia nos quatro anos seguintes. A ciência
pura parou, já que toda a pesquisa foi focalizada em meios de vencer a guerra.
Como voluntários para lutar por seus países, Harry Mosley, por exemplo,
que já era um nome famoso na física atómica em Oxford, se ofereceu para
fazer parte de uma das divisões do Novo Exército de Kitchener. Ele foi man-
dato de navio para Galípoli, no verão de 1915, para lutar-se as forças
aliadas que atacavam o território turco. Em carta à mãe, ele descreveu as
condições em Galípoli: "O único interesse real na vida são as moscas. Não
mosquitos, mas moscas de dia e moscas de noite, moscas na água e moscas
na comida". Ao alvorecer do dia 10 de agosto, 30 mil soldados turcos ini-
ciaram um ataque que resultou nos maiores combates à bala neta de

toda a guerra. Quando o assalto terminou, Moseley estava morto. Até mesmo a imprensa alemã lamentou sua morte, classificando-a como “uma perda cruel” (*ein schwerer Verlust*) para a ciência.

De modo semelhante, Karl Schwarzschild, diretor do Observatório de Potsdam, na Alemanha, também se ofereceu para lutar por seu país. Ele continuou a escrever trabalhos científicos enquanto estava preso nas trincheiras, incluindo um sobre a teoria da relatividade geral de Einstein, que mais tarde levou à compreensão dos buracos negros. No dia 24 de fevereiro de 1916, Einstein apresentou o trabalho à Academia Prussiana. E quatro meses depois Schwarzschild estava morto. Tinha contraído uma doença fatal na frente oriental.

Enquanto Schwarzschild se apresentava para lutar, seu equivalente no Observatório de Cambridge, Arthur Eddington, recusou-se a se alistar, com base em princípios religiosos. Educado como um quacre devoto, Eddington deixou clara sua posição: “Minha objeção à guerra é baseada em princípios religiosos... Mesmo se a abstenção dos opositores conscientes fizer a diferença entre a vitória ou a derrota, nós não podemos verdadeiramente beneficiar a nação com a desobediência obstinada à vontade divina”. Os colegas de Eddington apelaram para que ele fosse excluído do serviço militar com o argumento de que ele era mais valioso para o país como cientista, mas o Ministério do Interior rejeitou a petição. Parecia inevitável que a postura de Eddington como opositor consciente o levaria para um campo de prisioneiros.

Então Frank Dyson, o astrônomo real, veio salvá-lo. Dyson sabia que haveria um eclipse total do Sol no dia 29 de maio de 1919, e que aconteceria junto a um rico aglomerado de estrelas conhecido como as Híades — um excelente cenário para medir qualquer desvio gravitacional da luz. A trilha do eclipse cruzava a América do Sul e a África Central, de modo que fazer as observações implicaria montar uma grande expedição aos trópicos. Dyson sugeriu ao almirantado que Eddington poderia servir ao seu país organizando e liderando tal expedição, e, enquanto isso, ele deveria permanecer em Cambridge para prepará-la. Dyson apelou para o patriotismo, sugerindo que era dever de um cidadão inglês defender a gravidade de Newton contra a teoria germânica da relatividade geral. Em seu coração e em sua mente, Dyson

era pró-Einstein, mas ele era ridículos. Sua campanha de Eddington recebeu permissão preparando tudo para o eclipse.

De fato, Eddington era Einstein. Ele passara toda a vida, desde a idade de quatorze anos, estudando o céu. Tornou-se um aluno da Universidade de Cambridge com a maior distinção. E manteve os melhores resultados entre os colegas. Como pesquisador, era especialista em relatividade geral, e no devotamento à teoria da relatividade, que Einstein elogia “em todos os idiomas”. Eddington era amigo de Ludwig Silberstein, que também era um grande professor de física, uma vez disse para um grupo de pessoas no mundo que comungavam a mesma opinião: “Pelo contrário”, respondeu Silberstein, “não é só eu que penso assim.”

Além de ser intelectualmente brilhante, Eddington era uma figura inspiradora para liderar uma expedição que sobreviveria aos rigores de um longo viagem. As expedições astronômicas levam os cientistas aos seus limites. O cientista francês Jean d'Almeida, que observou o planeta Vênus em 1761, ele foi para a Sibéria para observar o sol em 1871, porque a população local acreditava que o sol havia apontado para o Sol. Ele morreu de febre na primavera, que tinham aconchegado suas observações do trânsito de Vênus. Mas a febre matou D'Auteroche, deixando apenas um sobrevivente.

De fato, Eddington era o homem perfeito para verificar a teoria de Einstein. Ele passara toda a vida fascinado pela matemática e pela astronomia. Tornou-se um aluno brilhante, ganhando uma bolsa de estudos na Universidade de Cambridge, onde foi o melhor aluno do ano, recebendo a maioria das distinguições. Como pesquisador, ficou bem conhecido como defensor das teorias de Einstein em elogiatas como "a melhor apresentação da relatividade geral, e no desenvolvimento da teoria matemática da relatividade geral, que Einstein realizou". E manterá sua reputação grande ao longo de sua carreira.

Ludwig Silberstein, que também se considerava uma autoridade em relatividade geral, uma vez disse para Eddington: "O senhor deve ser uma das pessoas no mundo que compreendem a relatividade geral". Eddington ficou aliviado em silêncio, ate que Silberstein lhe disse para não ser tão modesto. "Pelo contrário", respondeu Eddington, "Estou tentando lembrar quem é a

era pro-Emissim, mas ele esperava que esse subtérñego convencesse as autoridades. Sua campanha deu certo. A ameaga de prisao foi esquecida e Eddieington recebeu permissão para continuar trabalhando no observatorio, mesmo quando o edifício de 1919

Outras expedições eram menos perigosas para o corpo, porém mais exaustivas para a mente. Guillaume le Gentil, um dos colegas de D'Auteroche, também tinha planejado observar o trânsito de Vênus em 1761, mas viajou para Pondicherry, na Índia francesa, para testemunhar o evento. Quando chegou lá, os britânicos estavam em guerra contra os franceses, Pondicherry estava sitiada e Le Gentil não pôde desembarcar na Índia. Ele decidiu então se estabelecer em Maurício e ganhar a vida como comerciante enquanto esperava oito anos pelo trânsito de 1769. Desta vez ele conseguiu chegar a Pondicherry e desfrutou semanas de gloriosa luz solar nos dias anteriores ao trânsito, apenas para as nuvens aparecerem no momento crucial, obscurecendo completamente a visão. "Passei mais de duas semanas num estado de depressão", escreveu, "e quase não tinha coragem de pegar na pena para continuar meu diário. Várias vezes esta caiu de minhas mãos quando chegou a hora de relatar à França o destino de minha empreitada." Depois de uma ausência de 11 anos, seis meses e 13 dias, ele retornou para sua casa, na França, e descobriu que ela tinha sido saqueada. Mas conseguiu reconstruir sua vida escrevendo suas memórias, que se tornaram um grande sucesso comercial.

No dia 8 de março de 1919, Eddington e sua equipe deixaram Liverpool a bordo do HMS *Anselm* e se dirigiram para a ilha da Madeira, onde os cientistas se dividiram em dois grupos. Um grupo permaneceu a bordo do *Anselm* e viajou para o Brasil a fim de observar o eclipse em Sobral, no Ceará. Eddington e o segundo grupo embarcaram no cargueiro *Portugal* e foram para a ilha de Príncipe, em frente à costa da Guiné Equatorial, na África Ocidental. A idéia era de que, se as nuvens escondessem o eclipse no Brasil, talvez a equipe africana tivesse sorte, ou vice-versa. O clima decidiria o resultado das expedições, e assim ambas as equipes começaram a procurar um lugar ideal para a observação assim que chegaram aos seus destinos. Eddington usou um dos primeiros veículos com tração nas quatro rodas para explorar Príncipe, e afinal decidiu instalar seus equipamentos em Roca Sundy, um local elevado no noroeste da ilha, que parecia menos propenso ao céu nublado. Então a equipe passou a testar chapas fotográficas e a verificar equipamentos, garantindo que tudo estivesse perfeito para o grande dia.

As observações do e vez a luz das estrelas fo da gravidade de Newton mais significativo de ac dos discordassem de am estariam errados.

Einstein previa que a viada de 1,74 segundos das tolerâncias do equipamento por Newton. Esse desvio de um quilômetro, mov

À medida que o dia maram-se sobre Sobral, de observação de Eddington da Lua tocar a borda da condição de observação. Eddington registrou o que "A chuva cessou por volta quando a fase parcial d lumbrar o Sol e tivemos da fé. Eu nem vi o eclipse fotográficas. Só dei uma outra espiada no meio

A equipe de observaram montadas, expostas a condições de segundo. Eddington meia-luz que tomara pelos chamados dos observadores 302 segundos de totalic

Das 16 fotografias tiradas por fiapos de nuvens no momento de céu claro fôrtilico. Em seu livro *Esp* aconteceu com esta pre

Das 16 fotografias tiradas pela equipa de Principe, a maioria foi estragada por fios de nuvens obscurecendo as estrelas. De facto, durante o breve momento de céu claro foi possível tirar algumas uma fotografia de valor cien-
tífico. Em seu lar Espaço, tempo e gravidade, Eddington descreveu o que aconteceu com esta preciosa fotografia:

A equipa de observadores agiu com uma precisão militar. As chapas foram montadas, expostas e então removidas numa cronometragem de framamento. Eddieington anotou: "Estivemos clientes apenes da estranha gôes de segundos. Eddieington anotou: "Estivemos clientes apenes da estranha média-luz que tomara conta da paisagem, do silêncio da natureza, quebrado pelos chamas dos observadores, e da batida do metrônomo marcando os 302 segundos de totalidade".

A medida que o dia do eclipse se aproxima, nuances ameaçadoras for-
maram-se sobre Sóbral e Princípio, seguidas por chuvas e trovoadas. No sítio
de observação de Edidington, tempestade passou uma hora antes de o disco
da Lua tocar a borda do Sol, mas o céu ainda permanecia enevoado e as
condições de observação estavam longe do ideal. A missão corria perigo.
Edidington registrou o que aconteceu em seguida no seu livro de anotações:
"A chuva cessou por volta do meio-dia e por volta de uma da tarde,
quando a fase parcial do eclipse já estava bem avançada, começamos a vis-
lumbar o Sol e tivemos que realizar nosso programa de fotografias na base
da fe. Eu nem vi o eclipse, estava ocupado demais trocando as chapas fo-
tográficas. Se dei uma olhada para me certificar de que tinha comegado, e
outra espécie no meio para ver até que ponto estava nublado..."

Einstein previa que uma estrela que aparecesse na borda do Sol seria des-
estaria amarrada. Einstein previa que um seguidos de arco ($0,0005^\circ$), o que estava extremamente dentro das
tblerâncias do equipamento de Eddington e era duas vezes o desvio previsto
por Newton. Esse desvio angular era equivalente a uma vela, a uma distância
de um quilômetro, movendo-se para a esquerda apenas um centímetro.

As observações do eclipse poderiam levar a três resultados possíveis. Talvez a luz das estrelas fosse apena s ligeiramente desviada, como previa a teoria da gravidade de Newton. Ou, como Einstein esperava, haveria um desvio mais significativo de acordo com a relatividade geral. Ou talvez os resultados discordasse m de ambas as teorias, o que implicaria que Einstein e Newton